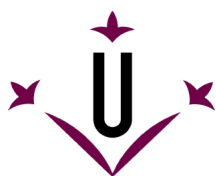

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA CAPACITAT D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA TÈRMICA DE DOS TANCS CONNECTATS EN CASCADA AMB DIFERENT PCM

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Màster en enginyeria industrial

Universitat de Lleida

Escola Politècnica Superior



Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior



Autor:

Gerard Peiró Bell-lloch

Directors:

Dra. Luisa F. Cabeza

Dr. Eduard Oró



Índex

Índex	2
Índex de taules.....	4
Índex de Figures.....	5
Nomenclatura	8
1. Introducció.....	9
1.1. Consum d'energia primària al món.....	9
1.2. Energia solar i aplicacions	11
1.3. Emmagatzematge d'energia tèrmica	13
2. Objectius	16
3. Abast.....	17
4. Antecedents.....	18
5. Metodologia	20
5.1. Descripció de la instal·lació experimental	20
5.2. Materials.....	21
5.3. Tancs d'emmagatzematge i configuració en cascada.....	24
5.4. Procediment Experimental	26
5.5. Escenaris d'estudi.....	27
5.6. Formulació matemàtica	30
6. Resultats i anàlisi	32
6.1. Escenari 1	32
6.1.1 Escenari 1.1	35
6.1.2 Escenari 1.2	39
6.1.3 Escenari 1.3	42



6.2. Escenari 2	47
6.3. Comparativa sobre el preu del PCM	54
7. Conclusions	55
8. Propostes de futur	58
9. Referències	59



Índex de taules

Taula 1. Entalpia i temperatures de canvi de fase dels materials utilitzats com a PCM en el present treball.....	22
Taula 2. Característiques geomètriques dels tancs d'emmagatzematge utilitzats a la planta pilot i massa de PCM que conté cada tanc.....	25
Taula 3. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.1.	38
Taula 4. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.2.	42
Taula 5. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.3	46
Taula 6. Comparativa en relació al preu del PCM que contenen els diferents sistemes estudiats en l'escenari 1 i 2.....	54

Índex de Figures

Figura 1. Esquema del model desenvolupament sostenible [1].	9
Figura 2. Percentatge sobre del consum d'energia primària al món l'any 1973 i 2010 segons el tipus de combustible [2].	10
Figura 3. Percentatge sobre les emissions totals de CO ₂ al món l'any 1973 i 2010 segons el tipus de combustible [3].	11
Figura 4. Balanç d'energia de la radiació solar incident a la terra [4].	12
Figura 5. Esquema de funcionament d'un cicle fred per absorció.	13
Figura 6. Imatge de la caldera elèctrica de la planta pilot del grup GRETA de la Universitat de Lleida.	20
Figura 7. Imatge del intercanviador aire-oli tèrmic instal·lat a la planta pilot.	21
Figura 8. Corbes experimentals de la cp i entalpia de la hidroquinona en funció de la temperatura.	23
Figura 9. Corbes experimentals de la cp i entalpia del d-mannitol en funció de la temperatura.	23
Figura 10. Imatge d'un tanc d'emmagatzematge de la planta pilot.	24
Figura 11. Situació dels sensors de la part principal del tanc.	26
Figura 12. Esquema dels diferents casos sotmesos a estudi en l'escenari 1.	28
Figura 13. Escenari 2: Comparació del sistema en cascada amb un tanc d'hidroquinona.	29
Figura 14. Escenari 2: Comparació del sistema en cascada amb un tanc de d-mannitol.	29
Figura 15. Perfil de temperatures del HTF i del PCM durant la càrrega (escenari 1).	33
Figura 16. Perfil de temperatures del HTF i del PCM durant la descàrrega (escenari 1).	34

Figura 17. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.1.....	35
Figura 18. Perfils de temperatura del HTF i potència absorvida durant la descàrrega del escenari 1.1.....	36
Figura 19. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.1.....	37
Figura 20. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.2.....	39
Figura 21. Perfils de temperatura del HTF i potència absorvida durant la descàrrega del escenari 1.2.....	40
Figura 22. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.2.....	41
Figura 23. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.3.....	43
Figura 24. Perfils de temperatura del HTF i potència absorvida durant la descàrrega del escenari 1.3.....	44
Figura 25. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.3.....	45
Figura 26. Evolució de l'energia acumulada pel PCM durant una càrrega del sistema cascada i dels tancs operant individualment.....	47
Figura 27. Evolució de l'energia acumulada per kg de PCM durant una càrrega del sistema en cascada i dels tancs operant individualment.....	49
Figura 28. Effectiveness durant el procés de fusió del PCM a cabal baix per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.....	50
Figura 29. Effectiveness durant el procés de solidificació del PCM a cabal baix per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.....	51
Figura 30. Effectiveness durant el procés de fusió del PCM a cabal alt per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.....	52
Figura 31. Effectiveness durant el procés de solidificació del PCM a cabal alt per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.....	53



Abreviacions

- **AHE:** Air Heat Exchanger.
- **CLHS:** Cascaded Latent Heat Storage. (Sistema connectat en cascada).
- **Dma:** d-mannitol.
- **DSC:** Differential Scanning Calorimetry.
- **HFR:** High Flow Rate.
- **HTF:** Heat transfer fluid.
- **Hyd:** hidroquinona.
- **LFR:** Low Flow Rate.
- **LHS:** Latent Heat Storage.
- **Non-CLHS:** Non-Cascaded Latent heat Storage (Sistema connectat en paral·lel).
- **PCM:** Phase Change material.
- **SHS:** Sensible Heat Storage.
- **TES:** Thermal Energy Storage.

Nomenclatura

Variable	Unitats	Definició
\dot{m}_{HTF}	kg/s	Cabal màssic d'HTF
Cp_{HTF}	kJ/kg·°C	Calor específic mig del HTF
ε	-	Effectiveness (eficàcia).
Q_{PCM}	kJ	Energia acumulada o cedida pel PCM en els tancs
Q_{steel}	kJ	Energia cedida o acumulada per l'acer dels tancs
Q_{HTF}	kJ	Energia tèrmica cedida o guanyada per l'HTF al seu pas pels tancs
H_i	kJ/kg	Entalpia acumulada del PCM del tanc en l'instant i
H_{i+1}	kJ/kg	Entalpia acumulada del PCM del tanc en l'instant i+1
M_{PCM}	kg	Massa total de PCM en el tanc
\dot{Q}_{HTF}	kW	Potència tèrmica cedida o guanyada per l'HTF al seu pas pels tancs
η_{ch}	-	Rendiment energètic de la càrrega
η_{disch}	-	Rendiment energètic de la descàrrega
$T_{HTF in}$	°C	Temperatura d'entrada del HTF al tanc d'emmagatzematge
$T_{HTF out}$	°C	Temperatura de sortida del HTF de tanc d'emmagatzematge
$T_{PC PCM}$	°C	Temperatura mitjana de canvi de fase del PCM

1. Introducció

Durant l'últim segle, l'energia ha passat a ser un factor clau i estratègic en el desenvolupament socioeconòmic de la nostra societat i en definitiva en la millora de la nostra qualitat de vida. Actualment la major part dels països basen el seu model de creixement en el consum dels combustibles fòssils però aquest no es pot mantenir indefinidament i comporta un cost molt elevat a llarg termini. El model de desenvolupament actual compromet l'equilibri entre l'àmbit social, econòmic i ambiental (Figura 1), degut a les emissions de gasos d'efecte hivernacle, generació de residus perjudicials pel medi ambient, etc. A més a més els recursos en que es basa el present model cada vegada són més escassos i per tant cada cop més es compromet el desenvolupament de les generacions futures.

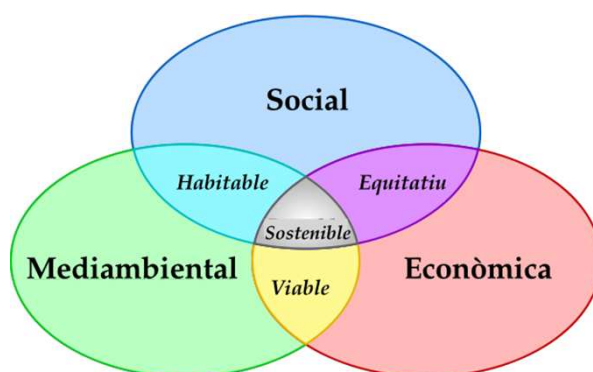


Figura 1. Esquema del model desenvolupament sostenible [1].

1.1. Consum d'energia primària al món

En els últims 40 anys el consum d'energia primària mundial ha augmentat fins a duplicar-se i actualment continua augmentant. L'any 1973 el consum mundial d'energia primària era de 6.107 Mtep¹ mentre que a l'any 2010 era 12.717 Mtep (Figura 2). Per altra banda, a la Figura 2 es pot observar la distribució en percentatge del consum d'energia primària segons el combustible. L'any 1973 el 86,7% del consum mundial

¹ Unitat de mesura energètica Mtep: Milions de tones equivalents de petroli. 1 tep equival a 41,87 GJ o 11630 kWh

d'energia primària estava basat en l'explotació dels combustibles fòssils (Gas natural-16%, petroli i derivats-46,1 % i carbó-24,6 %), un 0,9 % provenia de l'energia nuclear, un 1,8 % provenia de l'energia hidràulica i finalment un 0,1 % d'altres fonts d'energia renovable². En canvi, l'any 2010 un 81,1 % provenia de l'explotació dels combustibles fòssils (Gas natural-21,6%, petroli i derivats-32,4 i carbó-27,3 %), un 5,7 % de l'energia nuclear, un 2,3 % de l'energia hidràulica i un 0,9 % d'altres fonts d'energia renovable. Tal i com es pot observar el consum d'energia ha augmentat notablement però el model energètic pràcticament no ha canviat.

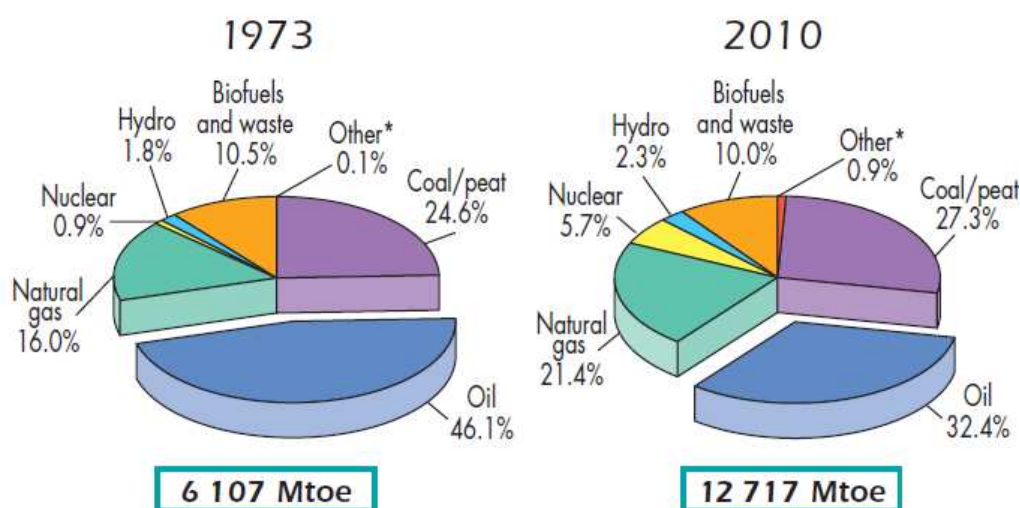


Figura 2. Percentatge sobre el consum d'energia primària al món l'any 1973 i 2010 segons el tipus de combustible [2].

Com es pot comprovar a la Figura 3, al augmentar demanda energètica també ho han fet les emissions de gasos nocius i d'efecte hivernacle a l'atmosfera contribuint així a l'escalfament global i a un deteriorament del medi ambient. Per exemple, l'any 1973 la quantitat total al món d'emissions de CO₂ varen ser de 15.637 Milions de tones mentre que l'any 2010 varen ser 30.326 Milions de tones.

Es per aquest motiu que per tal de poder reduir la quantitat d'emissions s'han de proposar alternatives al model actual que impliquin la realització de polítiques d'eficiència energètica, estalvi energètic i desenvolupar sistemes e instal·lacions més eficients. Però sobretot es fa necessària la utilització de les energies renovables i les seves aplicacions, destacant-ne l'energia solar.

² Energia solar, geotèrmica, eòlica, etc.

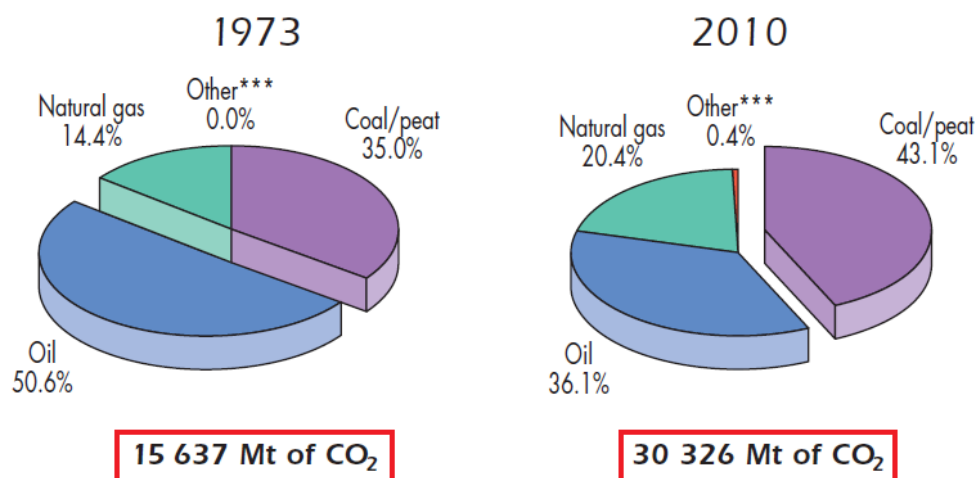


Figura 3. Percentatge sobre les emissions totals de CO₂ al món l'any 1973 i 2010 segons el tipus de combustible [3].

1.2. Energia solar i aplicacions

El sol proporciona un flux d'energia en forma de radiació electromagnètica de l'ordre de 174 PW^3 a l'atmosfera terrestre. Tot i que una part d'aquest flux es veu atenuat per fenòmens de reflexió i absorció a la pròpia atmosfera, l'energia restant que arriba a la terra continua essent molt elevada (89 PW). Aquest flux es absorbit pels oceans, per la terra i pot ser utilitzat en aplicacions energètiques (Figura 4).

Actualment es poden destacar dos tipus de tecnologies en funció del tipus d'aprofitament energètic de l'energia solar, l'energia solar fotovoltaica i la tèrmica. L'energia solar fotovoltaica és basa en l'aprofitament energètic de la radiació electromagnètica provinent del sol per obtenir energia elèctrica i l'energia solar tèrmica per obtenir energia en forma de calor.

Són moltes les aplicacions de l'energia solar, des de la generació elèctrica a la producció d'energia tèrmica per ACS, calefacció i/o refrigeració.

³ $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$

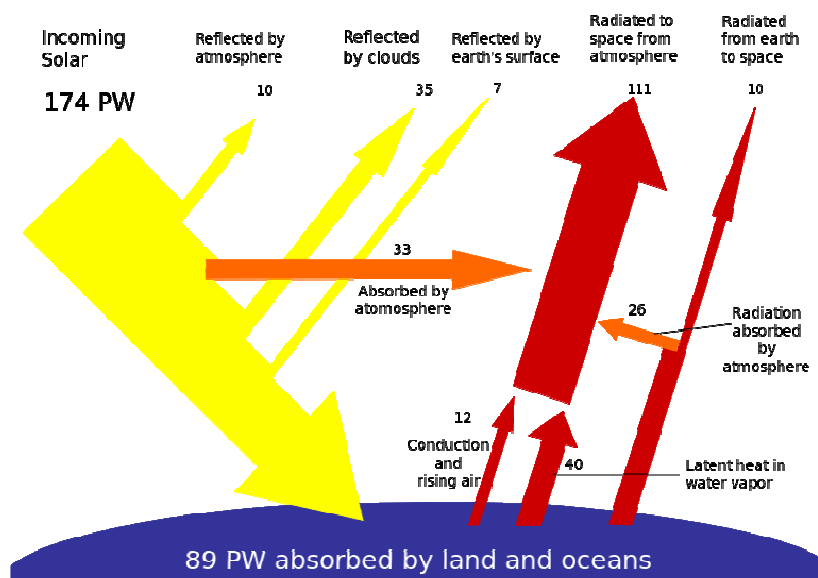


Figura 4. Balanç d'energia de la radiació solar incident a la terra [4].

Cal destacar que en els últims anys la refrigeració s'ha convertit en un factor essencial tan pel confort humà com per altres aplicacions tals com la conservació d'aliments. Aproximadament el 30% dels aliments frescos als països desenvolupats es perden per deficiències en els equipaments de refrigeració o per les irregularitats en el subministrament elèctric [5]. Els sistemes i equipaments de refrigeració més utilitzats actualment es basen en el cicle de compressió mecànica en el qual l'aportació de treball per comprimir el fluid refrigerant es realitza a través d'un compressor que consumeix energia elèctrica. Aquest sistemes contribueixen a l'escalfament global de manera significativa a través de les emissions de gasos refrigerants i per les emissions de CO₂ derivades del consum elèctric.

Una alternativa als sistemes de refrigeració per compressió, és la refrigeració solar on l'energia solar captada s'utilitza per alimentar el generador d'una màquina d'absorció per tal de satisfer una certa demanda de fred (Figura 5). El principal avantatge de la refrigeració solar és que utilitza una font d'energia renovable i per tant suposa una gran reducció dels costos energètics i mediambientals. Per altra banda, un altre avantatge d'utilitzar l'energia solar per generar fred, és que en la franja horària en que és més alta la demanda de fred també ho és la intensitat de la radiació solar. No obstant el principal desavantatge d'aquesta tecnologia és la naturalesa intermitent de l'energia solar. És per

aquest motiu que l'emmagatzematge d'energia tèrmica esdevé un factor clau en la refrigeració solar.

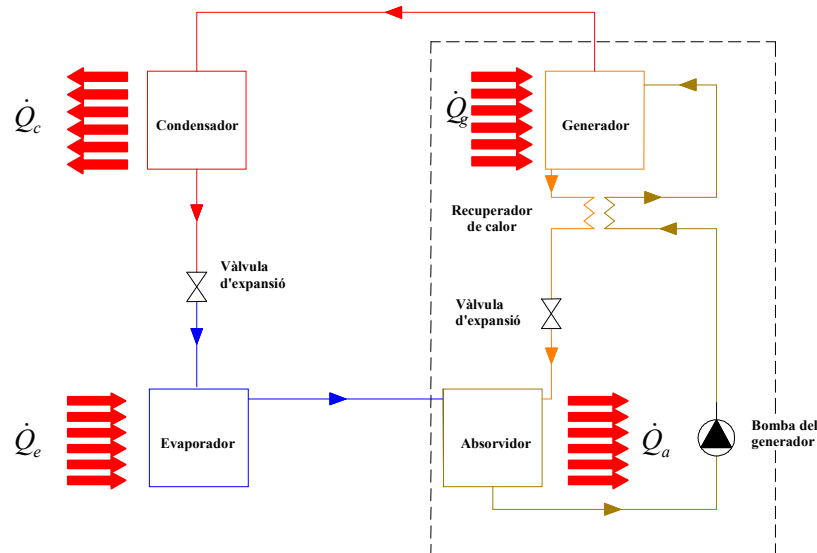


Figura 5. Esquema de funcionament d'un cycle fred per absorció.

1.3. Emmagatzematge d'energia tèrmica

L'emmagatzematge d'energia tèrmica (TES) suposa un mètode apropiat per tal d'equilibrar les diferències entre la demanda i la generació d'energia tèrmica en aplicacions que utilitzen l'energia solar. Bàsicament, es tracta d'emmagatzemar l'energia tèrmica provinent del sistema de captació solar que no es demandada, per ser utilitzada en posterioritat. D'aquesta forma s'incrementa l'eficiència de captació del camp solar i es redueixen els pics en la generació d'energia deguts a increments sobtats de la demanda.

Actualment es poden destacar tres formes o mètodes d'emmagatzematge d'energia, l'emmagatzematge per calor sensible (SHS), per calor latent (LHS) i l'emmagatzematge termoquímic.

L'emmagatzematge per calor sensible, és el sistema d'emmagatzematge que està més desenvolupat actualment, però alhora és el que presenta menors capacitats d'emmagatzematge. El mètode d'emmagatzematge per calor latent, presenta un



capacitat més gran d'emmagatzematge que l'anterior mètode, degut a les elevades entalpies de canvi de fase dels materials (PCM's), però presenta valors baixos ens els ratis de transferència de calor entre el PCM i el fluid caloportador (HTF) degut a la baixa conductivitat tèrmica dels materials de canvi de fase (entre 0,2 i 0,7 W/m·K). Finalment, l'emmagatzematge termoquímic és el mètode que presenta la capacitat d'emmagatzematge més alta respecte als altres dos mètodes anteriorment esmentats. Però actualment es troba en fase de desenvolupament, ja que existeixen diverses restriccions tècniques com el disseny dels reactors per a reaccions químiques específiques, l'estabilitat química dels materials i la durabilitat a llarg termini dels sistemes.

Aquest treball s'emmarca dins les línies de recerca en el camp de l'emmagatzematge d'energia tèrmica per calor latent. Bàsicament, les línies de recerca en aquest àmbit es centren en diversos aspectes bàsics com poden ser la recerca de nous materials en funció de les aplicacions, la millora de les propietats termofísiques dels mateixos, la millora de l'eficiència energètica dels sistemes d'emmagatzematge, relació cost-eficàcia, l'impacte ambiental, etc.

Una d'aquestes línies d'investigació es centra en la incorporació de diversos PCM's en cascada o sèrie amb l'objectiu de millorar els ratis de transferència de calor i millorar en les eficiències de càrrega i descàrrega, així com en els valors de l'exergia. Per exemple es destaquen les investigacions Gong and Mujumdar [6], els quals varen modelitzar numèricament un bescanviador basat en el disseny de carcassa i tubs, on els tubs de fluid caloportador estaven envoltats segments de diferents PCM's arranats en cascada. En aquest estudi es va poder observar que els sistema multifase o cascada millorava els ratis de transferència de calor respecte al mateix sistema amb un únic tipus de PCM. També és destaquen les investigacions de Watanabe and Kanzawa [7], Farid M. M [8], on es van poder obtenir conclusions similars a les anteriors en diferents dispositius i amb diferents materials.

En els anteriors estudis es descriu un sistema en cascada com la disposició en sèrie al llarg del flux d'HTF de diferents PCM's amb diferent temperatura de canvi de fase i el sistema no connectat en cascada com la disposició en sèrie de la mateixa massa d'un únic PCM al llarg del flux d'HTF. A més a més, es conclou que la millora presentada



pels sistemes en cascada respecte al sistemes no connectats en cascada es deu a que el primer sistema presenta una major diferència de temperatures entre el medi calent i el fred.

En el present treball, s'ha sotmès a estudi un sistema d'emmagatzematge per calor latent multi fase o cascada format per dos tancs amb PCM's amb diferent temperatura de canvi de fase (hidroquinona i d.-mannitol), però al no disposar d'un sistema en sèrie de dos tanc d'hidroquinona, dos tanc de d-mannitol o un tanc amb la meitat de massa de cadascun d'aquest materials, no s'ha pogut realitzar la comparativa amb un sistema no connectat en cascada. En el seu defecte s'ha realitzat la comparativa amb un sistema connectat en paral·lel, el qual pot ser útil en aplicacions en que es disposa de molt cabal d'HTF en processos industrials on és produeix molta calor residual o en processos on per limitacions tècniques o per maniobrabilitat no es pugui instal·lar un sistema en sèrie.



2. Objectius

El principal objectiu d'aquest treball és estudiar el potencial d'emmagatzematge d'energia tèrmica, per aplicacions de refrigeració solar, d'un sistema format per dos intercanviadors acumuladors de carcassa i tubs connectats en cascada o sèrie. Cada intercanviador conté un material diferent d'emmagatzematge en el seu interior. Concretament es tracta de dos materials de canvi de fase (PCM) hidroquinona i d-mannitol. Aquests materials tenen temperatures de canvi de fase compreses entre 140 °C i 200 °C, requerides en aplicacions de fred solar. També es pretén comparar els resultats obtinguts amb el sistema connectat en cascada (CLHS) amb els obtinguts amb els intercanviadors funcionant de manera independent i paral·lel (non-CLHS).

Objectius específics:

- Disseny de les connexions necessàries per a muntar la instal·lació en sèrie i fer el muntatge de les mateixes.
- Dissenyar i realitzar els experiments a escala de planta pilot per poder analitzar el comportament dels materials de canvi de fase.
- Processar i tractar les dades enregistrades durant els experiments.
- Realitzar els càlculs necessaris per tal d'avaluar el seu comportament tèrmic.



3. Abast

En aquest treball es contempla realització dels experiments necessaris per poder realitzar l'estudi esmentat anteriorment, així com el processat de les dades obtingudes i realització dels balanços d'energia i el càlcul de l'eficiència energètica el sistema.

Queda fora de l'abast d'aquest treball final de Màster, qualsevol altre estudi que impliqui un altra configuració dels tancs, altres materials i en definitiva, altres tipus d'estudi diferents a l'esmentat anteriorment en els objectius.

4. Antecedents

Tal i com s'ha comentat anteriorment, l'emmagatzematge d'energia tèrmica és un factor clau en aplicacions que utilitzen energia solar. Es per aquest motiu que en els últims anys s'han realitzat nombroses investigacions en aquest camp.

Entre els diferents estudis realitzats, es destaca l'estat de l'art de Gil et al. [9] on varen realitzar una revisió i classificació dels diferents sistemes d'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions d'alta temperatura en generació d'electricitat. Paral·lelament, Medrano et al. [10] varen presentar una sèrie de casos d'estudi, on es mostraven les diferents tecnologies d'emmagatzematge disponibles utilitzades en centrals elèctriques solars. També es destaca la publicació realitzada per Chidambaram et al. [5] on es mostra una revisió de les diferents tecnologies disponibles en aplicacions de refrigeració solar i dels diferents sistemes d'emmagatzematge. En aquesta última publicació es destaquen els sistemes d'emmagatzematge en cascada o multi fase, com una solució que millora el rendiment del camp solar, millora els ratis de càrrega i descàrrega així com la quantitat d'exergía acumulada respecte a les unitats d'emmagatzematge que operen de manera individual, tal i com s'ha mostrat en la introducció

Pel que fa a les investigacions o estudis realitzats sobre sistemes d'emmagatzematge per calor latent connectats en cascada per aplicacions d'energia solar, es destaquen els estudis de Shabgard et al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** on varen comparar el rendiment de tres tancs d'emmagatzematge amb tres PCM diferents (NaOH-NaCl , $\text{KCl-MnCl}_2+\text{NaCl}$ i $\text{NaOH+NaCl+Na}_2\text{CO}_3$) operant en cascada i de manera individual. En l'anteriorment esmentat estudi es va poder observar que el sistema connectat en cascada acumulava una major quantitat d'exergía respecte al que no estava. Per altra banda, Michels et al. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, varen utilitzar sals de nitrogen com NaNO_3 i KNO_3 com a PCM per obtenir un sèrie de resultats numèrics i experimentals d'un sistema format per un intercanviador de carcassa i tubs vertical amb diferents PCM's connectats en cascada. En aquest estudi es va poder afirmar que el sistema connectat en cascada oferia una millor utilització del canvi de fase i una temperatura de sortida del sistema més uniforme.



El present treball final de màster s'ha desenvolupat en el grup GREA de la universitat de Lleida. L'any 2009, mitjançant la col·laboració de l'empreses Gas Natural amb el grup GREA, es va dissenyar i projectar una planta pilot per poder assajar i experimentar en el camp de l'emmagatzematge d'energia tèrmica d'alta temperatura per aplicacions de refrigeració solar i generació elèctrica solar. Des de la posta en marxa de l'esmentada planta pilot, s'han realitzat diversos experiments i/o projectes, dels quals es destaca els estudis de Gil et al. [13]-[14] i Oró E. et al. [15], on varen implantar i testear diferents unitats d'emmagatzematge amb diferent PCM (hidroquinona i d-mannitol) per aplicacions de refrigeració solar, així com per avaluar el potencial de millora en la transferència de calor del PCM mitjançant aletes.

Els resultats obtinguts en els anteriorment esmentats estudis pel que fa a les unitats d'emmagatzematge de d-mannitol i la hidroquinona sense aletes operant individualment, són els que s'han utilitzat per realitzar una comparativa amb el sistema cascada objecte del present estudi.

5. Metodologia

5.1. Descripció de la instal·lació experimental

L'experimentació que s'ha dut a terme per a poder realitzar el present treball, s'ha realitzat mitjançant l'esmentada planta pilot amb la qual es pot realitzar diferents tipus d'experiments amb diferents tancs d'emmagatzematge, materials i condicions d'operació (cabal i temperatura del HTF)

La instal·lació de la planta pilot es compon principalment del sistema d'escalfament que consta d'una caldera elèctrica de fluid tèrmic de 24 kW_e (Figura 6), la qual opera en un rang de cabals de 0,3 a 3 m³/h i proporciona una potència tèrmica de 20 kW. El present sistema d'escalfament permet arribar a temperatures màximes de 400 °C, assolint una pressió màxima de treball de 15 bar. Aquest sistema pretén simular la captació d'energia que es produiria en el camp solar.

Les anteriors condicions màximes de funcionament, venen limitades pel fluid de treball (HTF) que en aquest cas es tracta d'un oli tèrmic sintètic anomenat *Therminol VPI*.



Figura 6. Imatge de la caldera elèctrica de la planta pilot del grup GREa de la Universitat de Lleida.

A la mateixa instal·lació, també es disposa d'un sistema de refrigeració per poder simular el consum d'energia i refredar el fluid de treball. Aquest sistema està format per un intercanviador compacte oli tèrmic-aire (AHE) de 20 kWt de potència. Aquest sistema opera amb 1800 m³/h d'aire i amb una temperatura d'entrada de l'aire igual que temperatura ambient que es pugui donar a la planta pilot. Les seves dimensions són 700 x 540 x 440 mm. A la Figura 7 es pot veure una imatge del dispositiu.

La instal·lació també disposa d'un sistema de canonades i vàlvules per tal de poder operar mitjançant diferents modes i on es connecten els diferents tancs d'emmagatzematge.

Finalment cal destacar el sistema de control, regulació i adquisició de dades amb el qual es controlen les condicions dels diferents experiment i s'enregistren diverses variables com el cabal del fluid caloportador, les pressions i les temperatures tant del fluid caloportador com del material d'emmagatzematge.



Figura 7. Imatge del intercanviador aire-oli tèrmic instal·lat a la planta pilot.

5.2. Materials

Els materials utilitzats en el present estudi són la hidroquinona i el d-mannitol. Tal i com s'ha comentat en l'apartat d'antecedents d'aquest treball, Gil et al. [13] varen comparar la hidroquinona i el d-mannitol com a PCM en dos tancs idèntics i de manera separada amb unes condicions de temperatura i cabal establertes per un sistema de fred



solar en concret. El primer factor a tenir en compte per la elecció d'aquests materials va ser al rang temperatures d'operació adequat per aplicacions de refrigeració solar. Aquest rang de temperatures va ser fixat entre 140 i 200 °C, on 200 °C representa la màxima temperatura que es podia obtenir del camp solar (en aquest cas es tractava de col·lectors *Fresnel*) i 140 °C la temperatura mínima d'entrada a la màquina d'absorció. Un altre requeriment era que el material havia de disposar d'una elevada entalpia de canvi de fase, en aquest cas es va estimar en un valor superior a 150 kJ/kg.

En l'esmentat estudi es va realitzar un selecció de diferent candidats segons els anteriors requeriments. Finalment es va triar la hidroquinona i el d-mannitol degut al seva elevada entalpia de canvi de fase.

Precisament, el rang de temperatures de fusió i l'entalpia de canvi de fase d'aquest materials varen ser caracteritzades mitjançant l'anàlisi DSC, prèviament al seu us a escala pilot. Més concretament, l'equipament utilitzat per obtenir-les va ser el model *DSC822* comercialitzat per *Mettler Toledo*. Els valors obtinguts per a cada una de les propietats i materials anteriorment esmentats es mostren a la Taula 1.

Taula 1. Entalpia i temperatures de canvi de fase dels materials utilitzats com a PCM en el present treball.

Material	Temperatura de canvi de fase [°C]	Entalpia de canvi de fase [kJ/kg]
Hidroquinona	166-172	235
d-mannitol	160-168	260

A la Figura 8 i a la Figura 9 es mostren les corbes del calor específic i l'entalpia de la Hidroquinona i el d-mannitol, obtingudes amb l'anàlisi DSC.

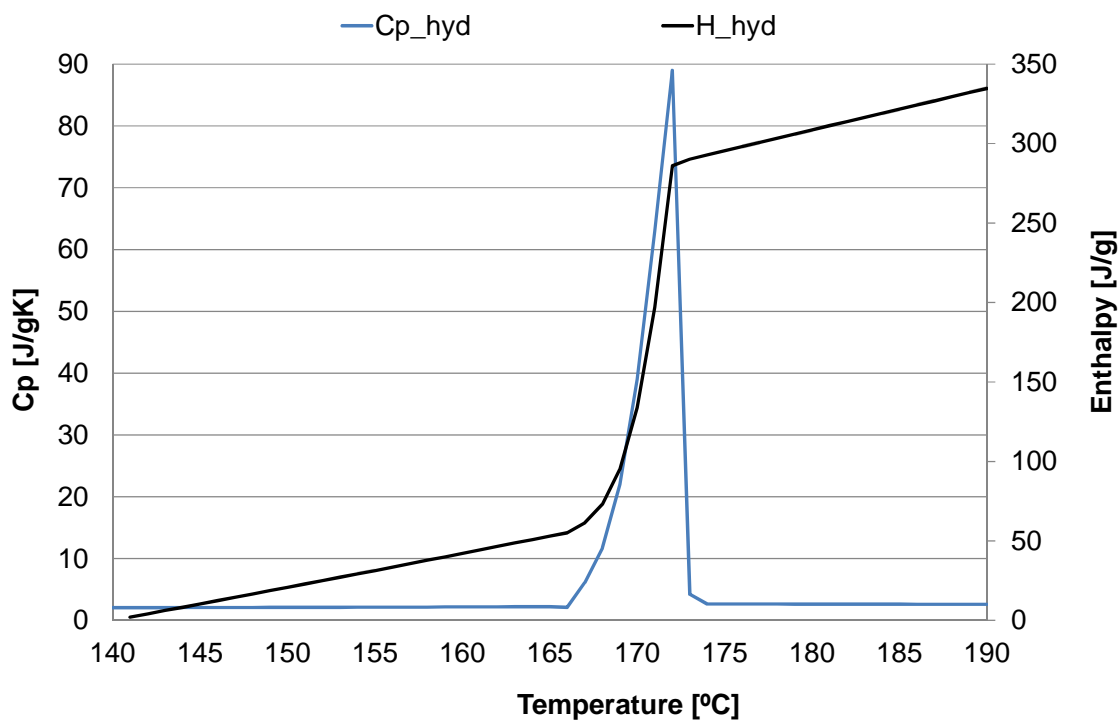


Figura 8. Corbes experimentals de la cp i entalpia de la hidroquinona en funció de la temperatura.

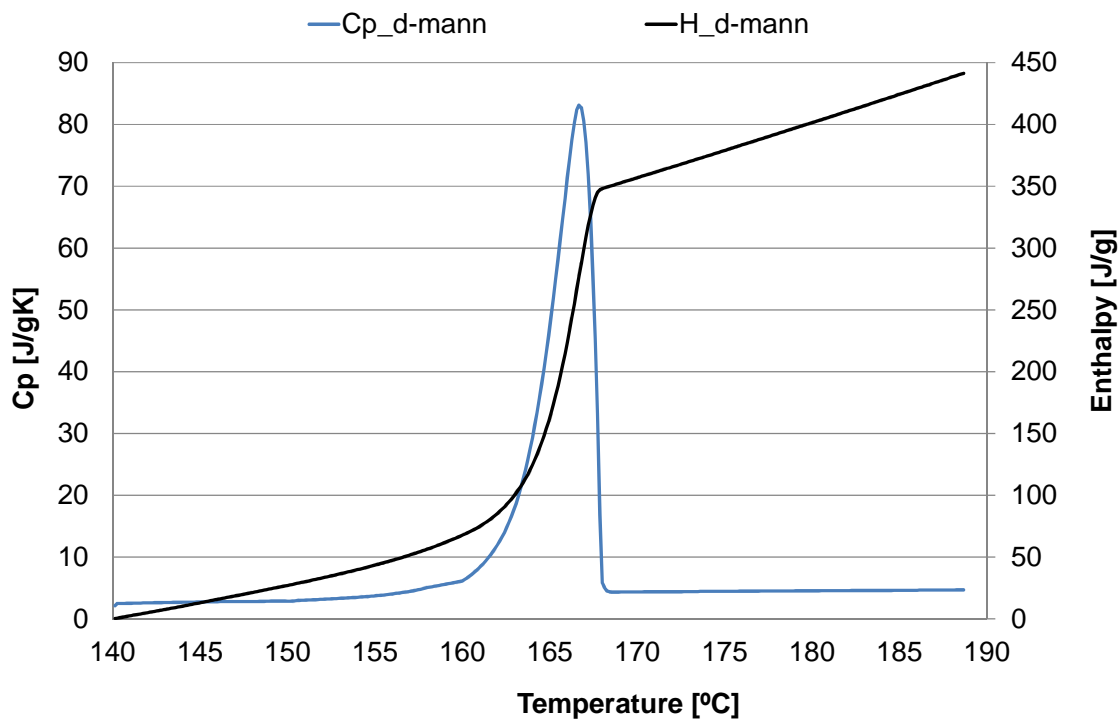


Figura 9. Corbes experimentals de la cp i entalpia del d-mannitol en funció de la temperatura.

5.3. Tancs d'emmagatzematge i configuració en cascada

Pel que fa al sistema d'emmagatzematge, es disposa dos tancs idèntics d'acer inoxidable de carcassa i tubs. Un amb hidroquinona i l'altre amb d-mannitol els quals s'han connectat en cascada.

Tal i com es pot veure en la Figura 10, els tancs es basen en un disseny de dos passos de tub en forma de U i un de carcassa. L'HTF flueix a través dels tubs i el material d'emmagatzematge (PCM) es situa a l'espai comprés entre la carcassa i els mateixos tubs.

A banda, s'han cobert les parets laterals i la part superior de cada tanc amb 24 cm de gruix de llana de roca i a la part inferior s'han situat 45 cm de *Foamglas* per tal de poder reduir les pèrdues de calor dels tancs amb l'ambient i/o el terra respectivament.

Les característiques geomètriques i la quantitat de massa de PCM que contenen les unitats d'emmagatzematge utilitzades en aquest treball es mostren a la Taula 2.

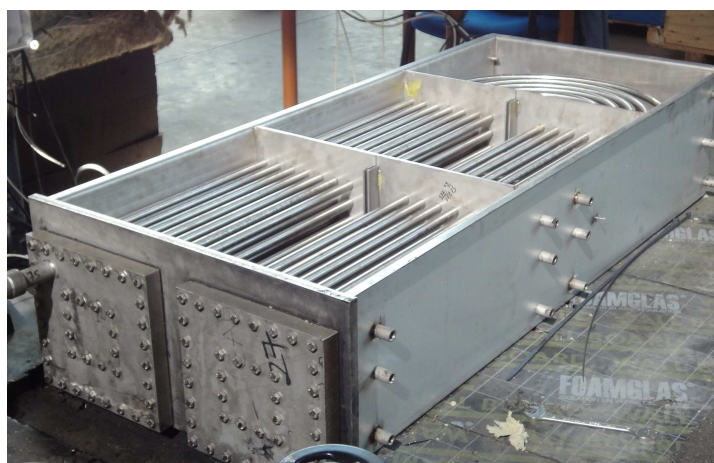


Figura 10. Imatge d'un tanc d'emmagatzematge de la planta pilot.



Taula 2. Característiques geomètriques dels tancs d'emmagatzematge utilitzats a la planta pilot i massa de PCM que conté cada tanc.

Característiques	Valor
Ample del tanc d'emmagatzematge [m]	0,527
Altura del tanc d'emmagatzematge [m]	0,273
Profunditat del tanc d'emmagatzematge [m]	1,273
Nombre de tubs [-]	49
Longitud mitjana dels tubs [m]	2,9
Superfície de transferència de calor [m ²]	6,568
Massa d'hydroquinona [kg]	170
Massa de d-mannitol [kg]	165

Per poder dur a terme l'anàlisi posterior del comportament tèrmic dels tancs d'emmagatzematge, s'han instal·lat 15 sensors de temperatura a la part interior de la carcassa del tanc (Figura 11). També s'han instal·lat 6 sensors en les cantonades i 6 sensors més en la part central del tanc. A més, per poder tenir dades sobre el comportament tèrmic del fluid caloportador, també s'han instal·lat dos sensors més a l'entrada i sortida del fluid al tanc. Finalment, amb l'objectiu de caracteritzar les pèrdues tèrmiques del sistema, s'han instal·lat sensors de temperatura de superfície a les parets interiors lateral e inferior, així com també a l'exterior del tanc sobre l'aïllament de llana de roca i sobre el terreny sota el tanc.

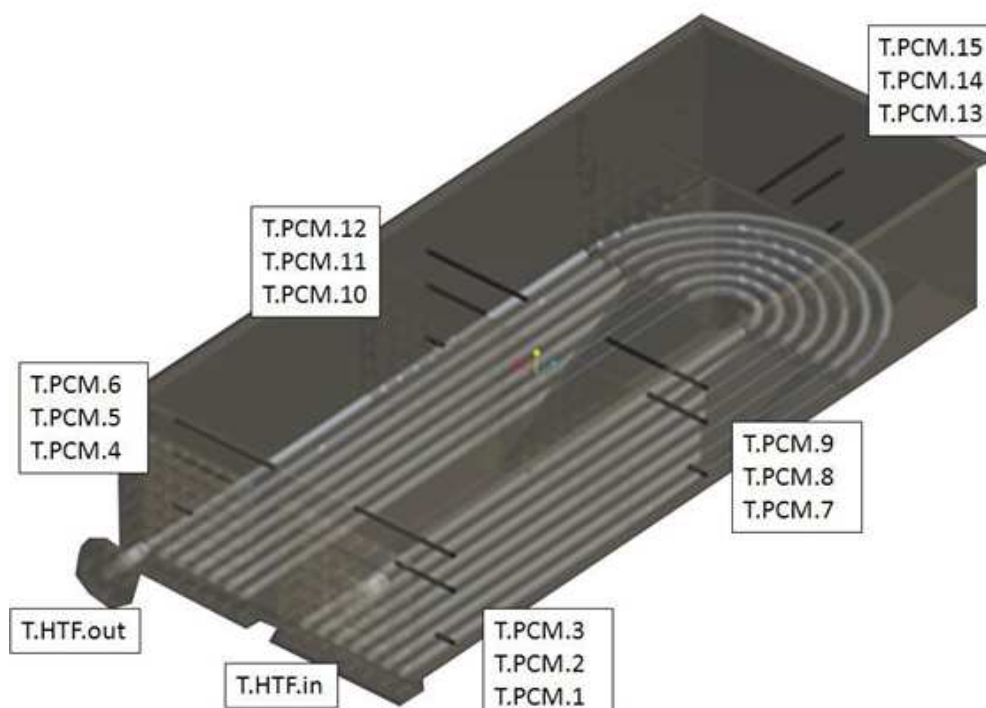


Figura 11. Situació dels sensors de la part principal del tanc.

Els sensors de temperatura utilitzats són del tipus Pt-100, calibrats amb una precisió de 0,1 °C. Paral·lelament també s'ha utilitzat un cabalímetre de placa orifici per mesurar el cabal volumètric del fluid caloportador als seu pas pels tancs.

5.4. Procediment Experimental

En el present estudi, s'han realitzat dos tipus d'experiments amb el sistema connectat en cascada. El primer tipus d'experiment s'ha realitzat amb un cabal del fluid de treball de 1,4 m³/h per assegurar un règim laminar i l'altre 2,8 m³/h per assegurar un règim turbulent. D'aquesta forma es pot avaluar l'efecte del tipus de règim en la transferència de calor del fluid de treball cap al PCM i a la inversa. Pel que fa a les condicions de temperatura, són exactament les mateixes en cada tipus d'experiment. El procés de càrrega s'inicia amb una temperatura del PCM en ambdós tancs de 145 °C i una temperatura del HTF de 187 °C. Per altra banda, la descàrrega s'inicia amb una temperatura del PCM de 187 °C i una temperatura del HTF de 145 °C. Per tal d'assegurar càrregues i descàrregues completes, s'han realitzat amb un temps 8 hores, respectivament. En el experiments realitzats amb el sistema connectat en cascada, el

fluid de treball flueix primer a través del tanc d'hidroquinona i després pel tanc de d-mannitol durant el procés de càrrega i a la inversa en el procés de descàrrega. Els experiments s'han realitzat d'aquesta forma per tal de que es completi el canvi de fase en ambdós materials, degut a que l'interval de temperatures de canvi de fase és més elevat en la hidroquinona que en el d-mannitol.

Per tal poder assegurar la repetibilitat i tenir suficients dades s'han realitzat tres experiment de cada tipus.

Les condicions esmentades en aquest apartat són les mateixes en que es varen dur a terme els experiments amb els tancs d'hidroquinona i d-mannitol operant individualment.

5.5. Escenaris d'estudi

Un cop realitzats els experiments amb les condicions anteriorment descrites, s'han definit els següents escenaris d'estudi:

ESCENARI 1:

En aquest escenari es pretén comparar el sistema format pels tancs connectats en cascada amb el sistema format pels tancs connectat en paral·lel. En conseqüència s'han generat els següents tres sub-casos:

Escenari 1.1: El sistema connectat en cascada es compara amb dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel.

Escenari 1.2: El sistema connectat en cascada es compara amb dos tancs de d'hidroquinona connectats en paral·lel

Escenari 1.3: El sistema connectat en cascada es compara amb un tanc de d'hidroquinona i un tanc de d-mannitol connectats en paral·lel

A la Figura 12 es pot veure un esquema del procediment que s'ha sotmès a estudi en l'escenari 2.

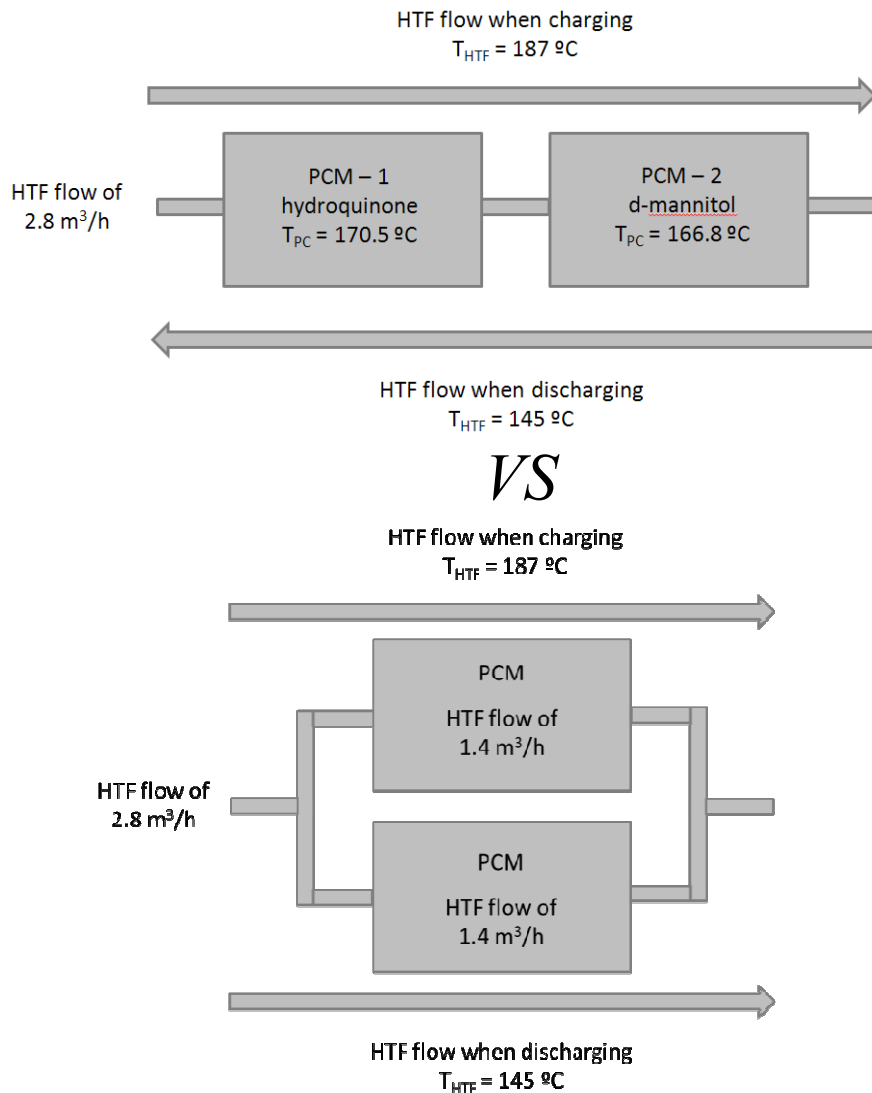


Figura 12. Esquema dels diferents casos sotmesos a estudi en l'escenari 1.

Tal i com es pot observar, la comparativa dels diferents casos de l'escenari 2, només s'ha pogut realitzar a cabal alt ($2,8\text{ m}^3/\text{h}$) per limitacions de la instal·lació. En conseqüència, es considera que en la connexió en paral·lel passen $1,4\text{ m}^3/\text{h}$ per cada tanc.

- **ECENARI 2:**

En aquest escenari d'estudi, bàsicament es compara el sistema connectat en cascada amb cada tanc operant per separat amb les mateixes condicions. En aquest cas s'ha

dividit l'escenari d'estudi en dos sub-casos, segons si es tracta d'experiments a cabal baix (LFR-1,4 m³/h) o cabal alt (HFR-2,8 m³/h).

A la Figura 13 i a la Figura 14 es pot veure uns esquema dels procediments que s'han sotmès a estudi en l'escenari 2.

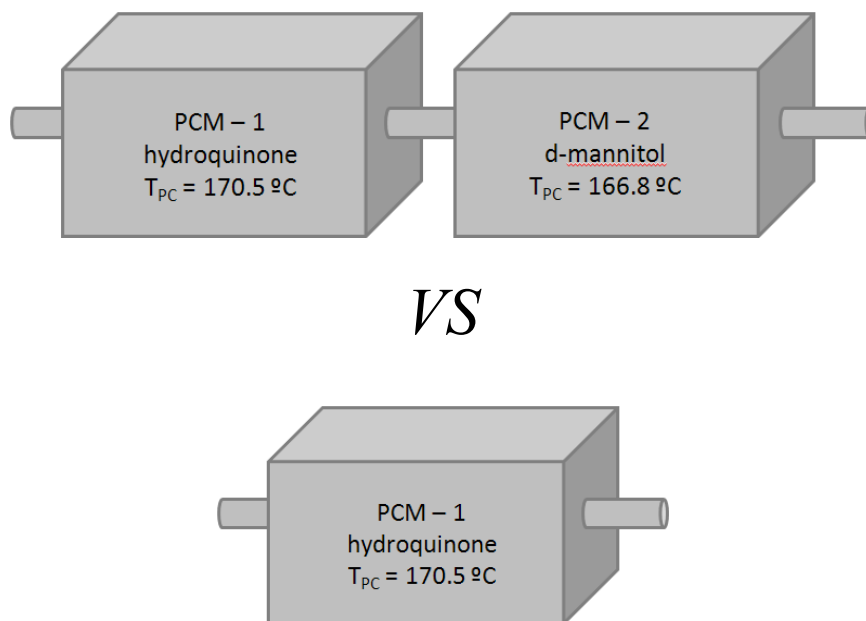


Figura 13. Escenari 2: Comparació del sistema en cascada amb un tanc d'hydroquinona.

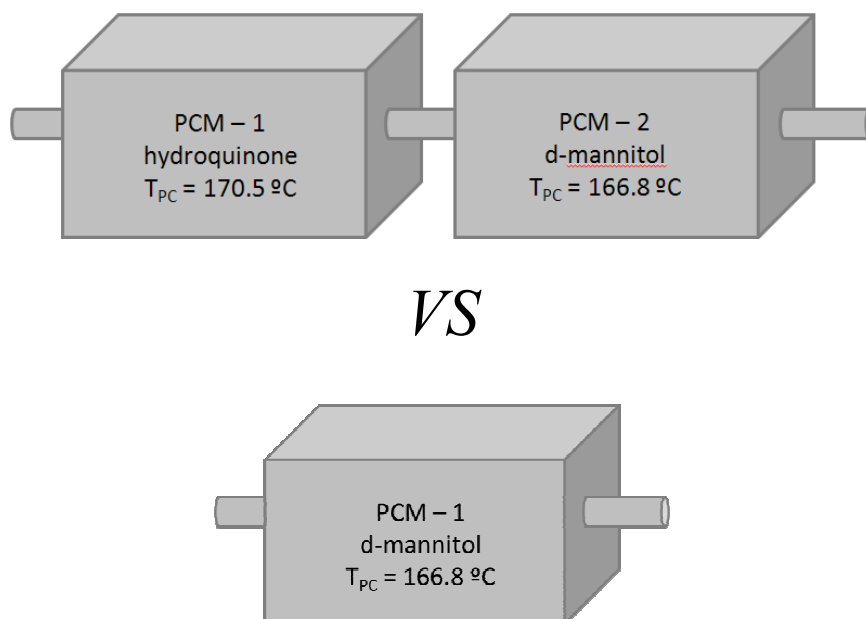


Figura 14. Escenari 2: Comparació del sistema en cascada amb un tanc de d-mannitol.

5.6. Formulació matemàtica

Mitjançant les temperatures d'entrada i sortida del tanc del HTF i el cabal mesurat amb el cabalímetre es pot determinar la potència tèrmica de l'HTF al seu pas pel tanc d'emmagatzematge, durant la càrrega o la descàrrega del PCM, respectivament (Equació 1).

$$\dot{Q}_{HTF} = m_{HTF} \cdot \bar{C}p_{HTF} \cdot (T_{HTF\,in} - T_{HTF\,out}) \quad \text{Equació 1}$$

Pel que fa a l'energia acumulada o cedida pel PCM, existeixen dues formes de calcular-la, mitjançant un balanç d'energia al tanc i mitjançant l'entalpia de canvi de fase mostrada en l'apartat 5.2.

En aquest cas s'ha optat pel càlcul mitjançant l'entalpia de canvi de fase del PCM (Equació 2), ja que l'objectiu principal del present treball es comparar la capacitat d'emmagatzematge del sistema connectat en cascada amb el que no ho està.

$$Q_{PCM} = M_{PCM} \cdot \Delta H_{PCM} = M_{PCM} \cdot (H_{i+1} - H_i) \quad \text{Equació 2}$$

Com la temperatura del PCM no és uniforme i varia en el temps s'ha optat per dividir en 27 volums de control el tanc, tants com sondes de temperatura es disposa en l'interior del mateix. A partir de la massa de cada volum de control i la temperatura associada a cada un, s'ha calculat una temperatura mitja del PCM representativa de tot el tanc. Aquesta temperatura s'ha utilitzat per calcular l'entalpia del PCM en cada instant dels diferents experiments realitzats, a partir de les corbes obtingudes amb l'anàlisi DSC mostrat a la Figura 8 i Figura 9 de l'apartat 5.2 d'aquest treball.

Un altre paràmetre important en l'anàlisi del comportament tèrmic del sistemes estudiats és el paràmetre anomenat *effectiveness*. Tal i com s'estableix en l'article de Gil et al. (2013) [14] esmentat en anterioritat, el paràmetre *effectiveness* es defineix com la



proporció de calor transferida entre el HTF i el PCM real en el tanc respecte la màxima teòrica. Es calcula mitjançant l'Equació 3.

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{experiment}}}{Q_{\text{theoric}}} = \frac{(T_{HTF \text{ in}} - T_{HTF \text{ out}})}{(T_{HTF \text{ in}} - T_{PC \text{ PCM}})}$$

Equació 3

On:

$T_{PC \text{ PCM}}$ [°C] és la temperatura mitja de canvi de fase del PCM. En aquest cas s'ha considerat 170,5 °C per la hidroquinona i 166,5 °C pel d-mannitol.

Altres paràmetres indicadors que s'han calculat a fi de poder tenir més informació sobre el comportament dels diferents sistemes estudiats són el rendiment de càrrega (Equació 4) i descàrrega (Equació 5).

$$\eta_{ch} = \frac{Q_{PCM}}{Q_{HTF}}$$

Equació 4

$$\eta_{disch} = \frac{Q_{HTF}}{Q_{PCM} + Q_{steel}}$$

Equació 5

6. Resultats i anàlisi

6.1. Escenari 1

Tal i com s'ha comentat en anterioritat, en aquest escenari d'estudi es realitza una comparativa entre el sistema dels dos tancs connectats en cascada amb els tancs connectats en paral·lel sota les mateixes condicions.

A la Figura 15 es mostren els perfils de temperatura del HTF així com el perfil de temperatures del PCM durant la càrrega. En aquest cas, s'ha utilitzat la temperatura mitja del PCM ponderada amb la massa.

Per tal de facilitar la comprensió dels resultats s'ha establert una temperatura mitja d'entrada de l'HTF pels dos sistemes estudiats ($T_{HTF.in}$). A partir d'aquí, s'ha realitzat la comparativa entre la temperatura de sortida de l'HTF en el sistema connectat en cascada ($T_{HTF.out(casc)}$), la temperatura de sortida de l'HTF del tanc d'hydroquinona ($T_{HTF.out(hyd)}$) i la del tanc de d-mannitol ($T_{HTF.out(dma)}$). Tal i com s'esperava, el comportament de la temperatura de sortida de l'HTF en el sistema connectat en cascada presenta un resposta més lenta a l'inici de la càrrega respecte la temperatura de sortida dels tancs operant en paral·lel. A partir de les dues hores de càrrega s'observa que totes les temperatures de sortida de l'HTF presenten valors similars.

Pel que fa a les temperatures del PCM, s'observa que les corbes de temperatura del sistema connectat en cascada ($T(hyd-C)$ i $T(dma-C)$) presenten majors valors durant quasi tot el període de càrrega, respecte les del sistema connectat en paral·lel ($T(hyd)$ i $T(dma)$). Es tracta d'un comportament esperat ja que en el sistema en cascada per cada tanc hi passa el doble de cabal d'HTF que en el sistema connectat en paral·lel.

Mitjançant les corbes de temperatura mitja del PCM es pot concloure que el procés de càrrega dura aproximadament entre 6 i 7 h pel sistema connectat en paral·lel i de l'ordre d'una hora menys pel sistema connectat en cascada.

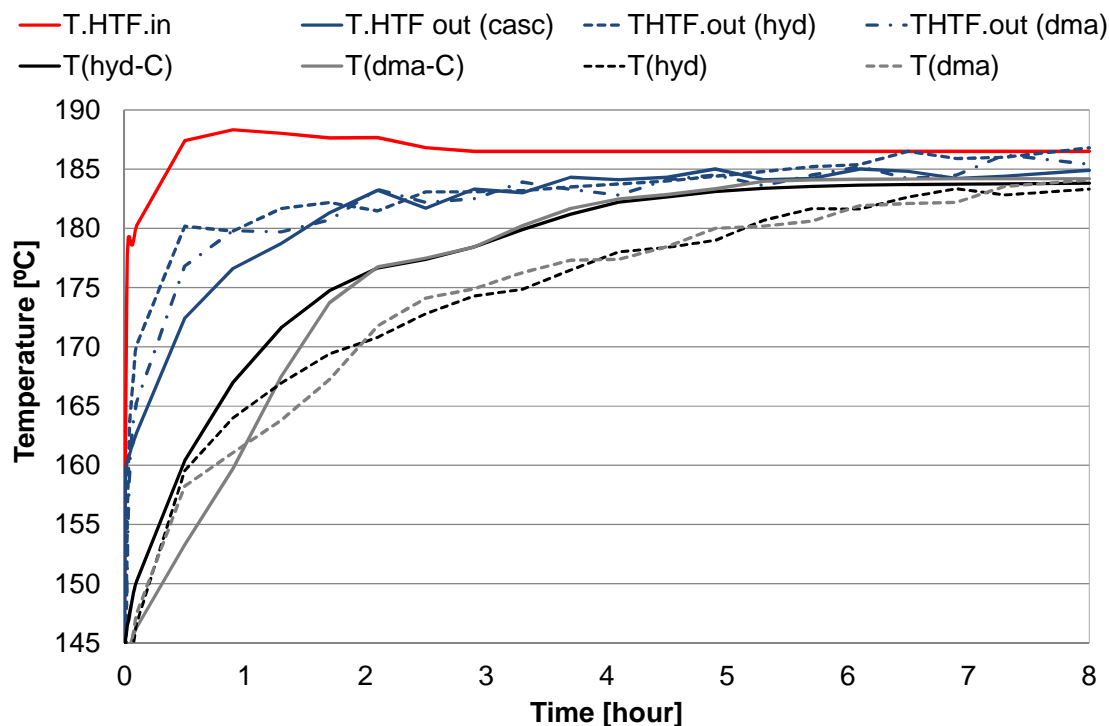


Figura 15. Perfil de temperatures del HTF i del PCM durant la càrrega (escenari 1).

A la Figura 16 es mostren els perfils de temperatura de l'HTF així com el perfil de temperatures del PCM durant la descàrrega. S'observa, que les temperatures de sortida de de l'HTF en el sistema connectat en paral·lel (T.HTF.out (hyd) i T.HTF.out (dma)) presenten un comportament pràcticament idèntic. Pel que fa al perfil de temperatura de sortida l'HTF en el sistema connectat en cascada (T.HTF.out (casc)), a l'inici de la càrrega presenta la mateixa resposta que les anterior variables, però en general durant el procés de descàrrega presenta una resposta més lenta. Això pot ser degut a que el sistema en cascada en comparació amb cada tanc per separat posseeix més inèrcia tèrmica.

Pel que fa a les temperatures del PCM, s'observa que temperatura mitja de la hidroquinona del sistema connectat en cascada i la temperatura de la hidroquinona del tanc operant per separat presenten pràcticament el mateix comportament tot i que la primera variable presenta una resposta més ràpida l'inici de la descàrrega.

La diferència més important es destaca en els perfils de d-mannitol bàsicament per la presència del fenomen de *subcooling*. El subcooling bàsicament és un efecte que

apareix majoritàriament en la solidificació en el qual un líquid es refreda per sota el seu punt de fusió sense cristal·litzar-se. Aquest efecte no es desitja en l'emmagatzematge per calor latent, ja que augmenta els temps de descàrrega i amplia el rang de temperatura d'operació del PCM, a més a més es perd energia emmagatzemada en el procés.

Tal i com es pot observar en el sistema connectat en cascada, el perfil de temperatura del d-mannitol ($T(\text{dma-C})$) presenta un *subcooling* molt exagerat fins al punt que temperatura del d-mannitol s'igualava amb la temperatura d'entrada de l'HTF entre els primers 30 min i la primera 1h i 30 min de descàrrega. En els tancs de d-mannitol operant en paral·lel, també s'observa un lleuger *subcooling* sobre els primers 30 min. Aproximadament a partir de les 3 h de descàrrega tots els perfils de temperatura de PCM presenten un comportament similar.

De la mateixa forma que en la càrrega es pot concloure que el temps de descàrrega és en tots els casos d'estudi es troba entre 6 i 7 h en ambdós sistemes estudiats. En aquest cas el sistema en cascada tarda aproximadament una hora més en descarregar-se que en carregar-se. Aquest fet es deu majoritàriament al *subcooling* que presenta el d-mannitol.

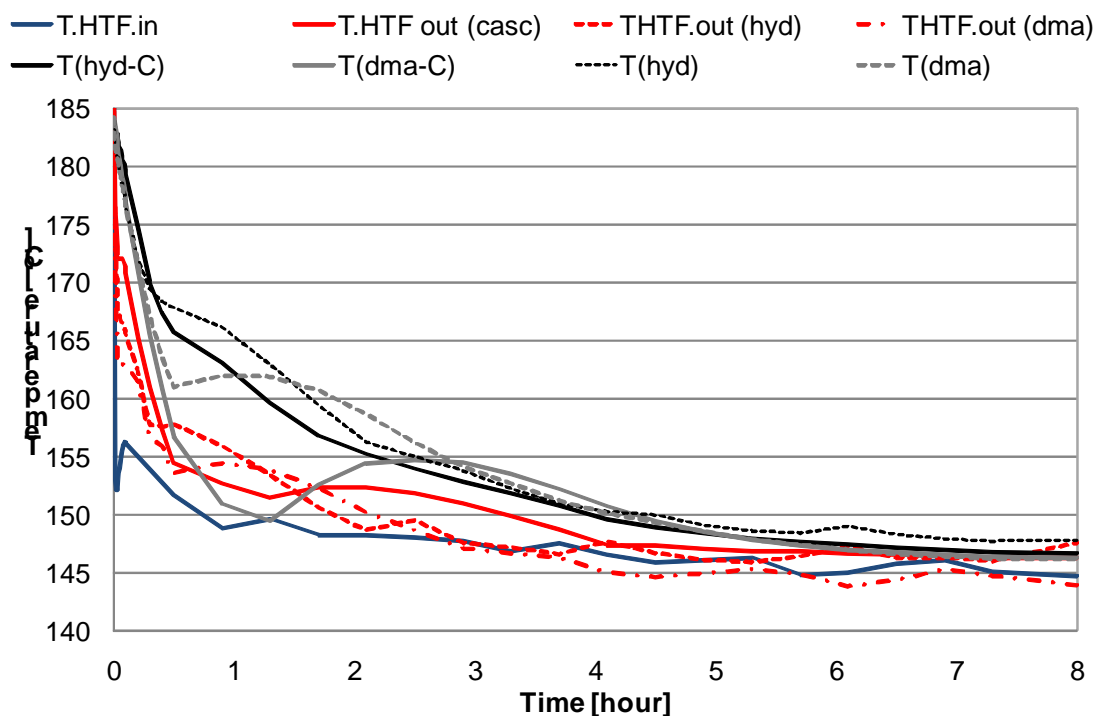


Figura 16. Perfil de temperatures del HTF i del PCM durant la descàrrega (escenari 1).

Un cop analitzats els perfils de temperatura es procedeix a l'anàlisi del diferents casos proposats en l'escenari 1.

6.1.1 Escenari 1.1

A la Figura 17 es mostra el perfil de temperatures de l'HTF i la potència tèrmica cedida pel mateix en el sistema connectat en cascada i en el sistema format per dos tancs de d-mannitol en paral·lel. Com era d'esperar tant la potència del HTF del sistema en cascada (Cascaded) com la dels 2 tancs de d-mannitol (2xdma) presenten valors més elevats a l'inici de la càrrega degut a que la diferència de temperatures entre la entrada i la sortida del HTF és més gran. Es pot observar que els dos sistemes presenten un comportament similar pel que fa a la potència cedida per de l'HTF. A la mateixa figura s'observa que a l'inici de la càrrega el sistema connectat en cascada presenta valors superiors de potència cedida per l'HTF. Aquest fet es deu a la major diferència de temperatures entre l'entrada i la sortida de l'HTF que presenten els tancs connectats en cascada.

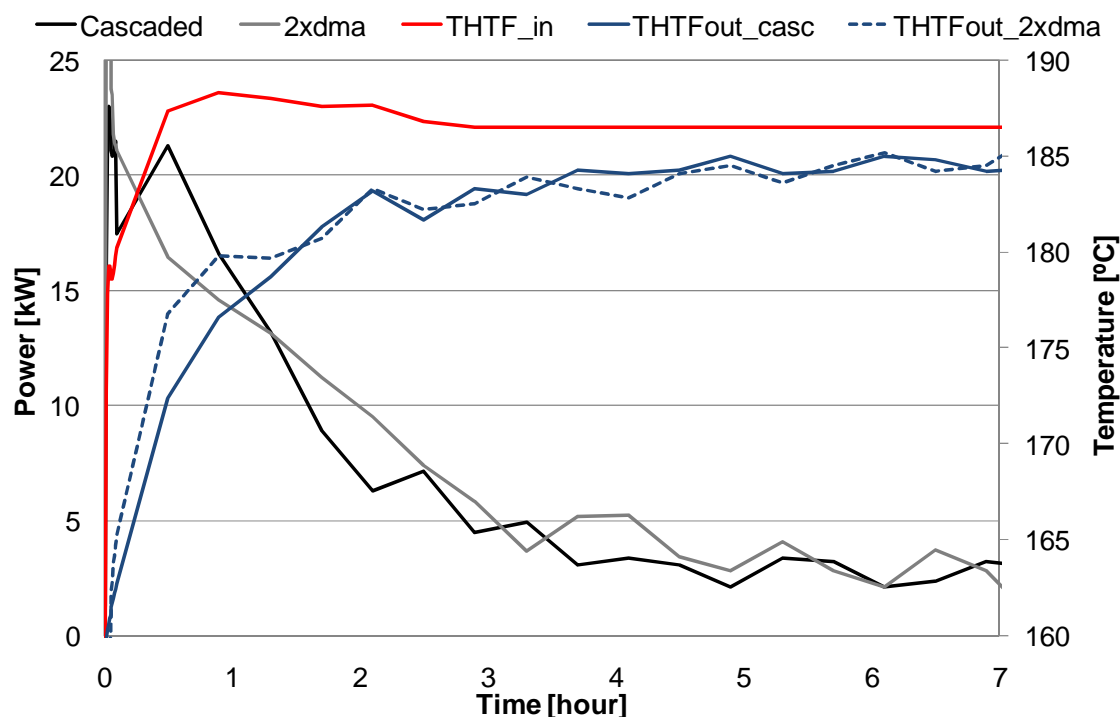


Figura 17. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.1.

A la Figura 18 es mostra el perfil de temperatures del HTF i la potència tèrmica absorbida per l'HTF pel sistema connectat en cascada i pels dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel durant la descàrrega.

S'observa que els perfils de potència absorbida per l'HTF en el sistemes estudiats en aquest cas, presenten un comportament semblant durant tota la descàrrega excepte entre els primers 30 min i 3 h de descàrrega en que l'HTF dels sistema format per dos tancs de d-mannitol presenta majors valors de potència absorbida.

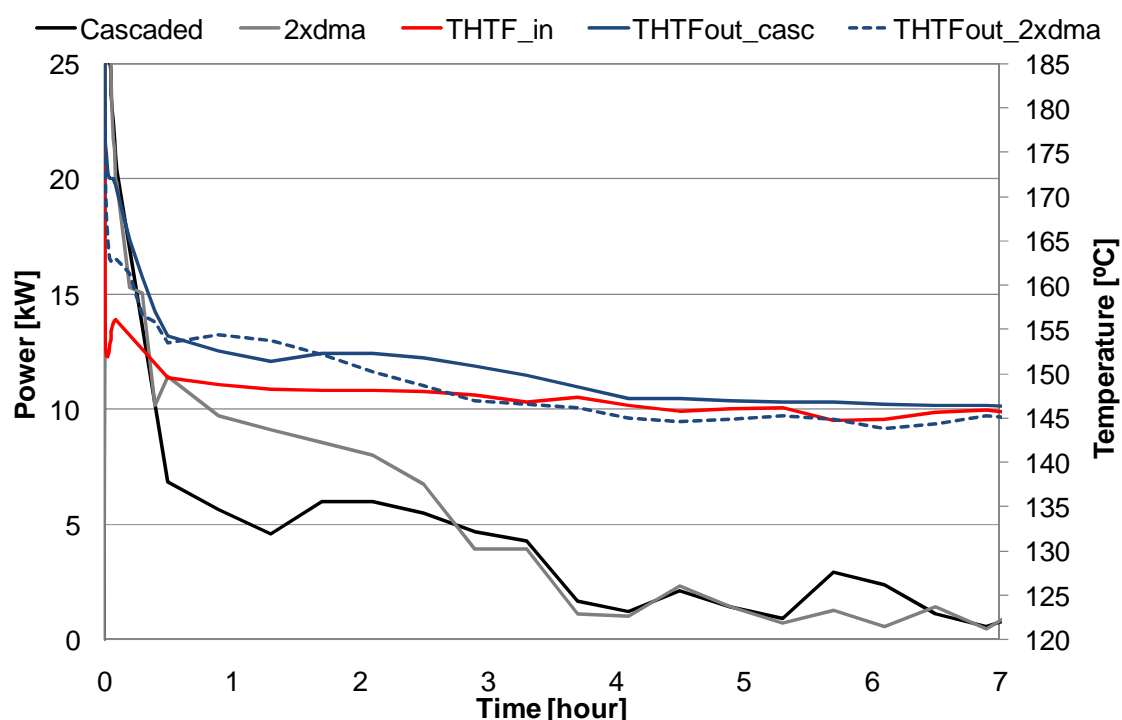


Figura 18. Perfils de temperatura del HTF i potència absorbida durant la descàrrega del escenari 1.1.

A la Figura 19 es pot veure l'evolució en el temps de l'energia acumulada pel PCM durant la càrrega per l'escenari 1.1. A la mateixa figura es pot observar l'energia acumulada pel sistema connectat en cascada (Cascaded), l'energia acumulada pel sistema de dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel (NON-cascaded (2xdma)), l'energia acumulada per cada tanc en el sistema connectat en cascada (Cas (hyd) i Cas (dma)) i finalment també es pot veure l'energia acumulada per un tanc de d-mannitol operant individualment (Dma). En general, s'observa que el sistema format pels dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel acumula aproximadament un 10 % més

d'energia respecte sistema connectat en cascada, 37,7 i 33,9 kWh, respectivament. Aquest fet es deu bàsicament a que l'entalpia de canvi de fase del d-mannitol és més elevada que la hidroquinona. També s'observa que abans de 2 h de càrrega, el sistema connectat en cascada presenta majors valors d'energia acumulada. També es pot afirmar que a les dues hores de càrrega el sistema en cascada i el sistema en paral·lel es troben en un percentatge de càrrega d'un 93 % i un 86 %, respectivament. Per tant, si es consideren càrregues completes presenta un millor comportament el sistema format per dos tancs de d-mannitol en paral·lel, per a càrregues parcials de 2 h és millor una combinació en cascada.

Pel que fa al tanc d'hidroquinona en el sistema en cascada (Cas (hyd)), és el que presenta menors valors d'energia acumulada degut a que posseeix menor entalpia.

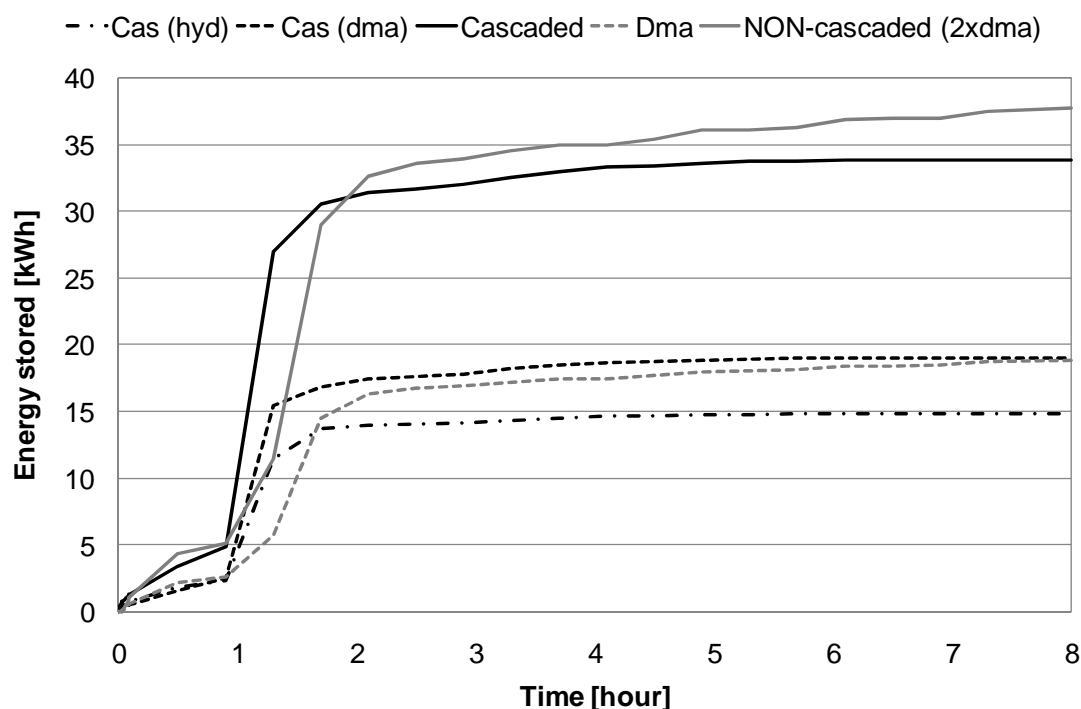


Figura 19. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.1.

Pel que fa a la descàrrega no es pot realitzar una comparativa entre sistemes, ja que el gran *subcooling* que apareix en el d-mannitol del sistema connectat en cascada fa que no es pugui caracteritzar correctament l'energia acumulada en el temps. Per altra banda, s'ha calculat l'energia total cedida pel PCM en cada cas durant la descàrrega.



A la

Taula 3 es mostren els valors d'energia acumulada i/o cedida pel PCM i HTF durant la càrrega i descàrrega així com els respectius rendiments dels dos sistemes estudiats en l'escenari 1.1.

Tal i com era d'esperar l'energia total que s'acumula en cada sistema durant la càrrega és aproximadament la mateixa que es cedeix en la descàrrega. Pel que fa a l'energia cedida per l'HTF en la càrrega, és pràcticament la mateixa en els tancs connectats en cascada que en el dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel. En canvi en la descàrrega l'HTF recupera 6 kWh menys en el sistema en cascada respecte al sistema en paral·lel de d-mannitol. Aquest fet es degut a que el sistema en cascada presenta més pèrdues tèrmiques en la connexió entre tancs, degut a un mal aïllament i menys energia acumulada en el PCM durant la càrrega, donat que la hidroquinona posseeix menys entalpia que el d-mannitol. Pel que fa als rendiments de càrrega i descàrrega és conclou que amddòs sistemes presenten valors semblants, entre 70 % i 85 %.

Taula 3. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.1.

	Cascaded	NON-Cascaded (2xdma)
Energia acumulada pel PCM durant la càrrega [kWh]	33,9	37,7
Energia cedida pel PCM durant la càrrega [kWh]	32,9	36,9
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	48,2	49,4
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	27,3	33,3
η_{ch} [-]	0,7	0,76
η_{disch} [-]	0,8	0,85

6.1.2 Escenari 1.2

A la Figura 20 es mostra el perfil de temperatures de l'HTF i la potència tèrmica cedida pel mateix en el sistema connectat en cascada i en el sistema format per dos tancs d'hidroquinona en paral·lel. En aquest cas, es segueix la mateixa nomenclatura que en l'escenari 1.1, amb la diferència que les variables del sistema en paral·lel van seguides del subíndex "2xhyd" fent referència als dos tancs d'hidroquinona. A l'igual que en l'escenari 1.1, s'observa que en l'inici de la càrrega el sistema connectat en cascada presenta valors majors de potència cedida per l'HTF respecte el sistema en paral·lel. També s'observa que aquesta tendència es manté durant més temps que en l'escenari 1.1, més concretament durant les primeres dues hores de càrrega. Aquest fet es deu principalment a que la temperatures de sortida de l'HTF en el sistema en paral·lel i el sistema en cascada tarden més temps en igualar-se que en en l'escenari 1.1. Es tracta d'un fet esperat ja que el sistema connectat en paral·lel necessita menys energia per completar el canvi de fase de la hidroquinona degut a la menor entalpia de canvi de fase que aquesta posseeix.

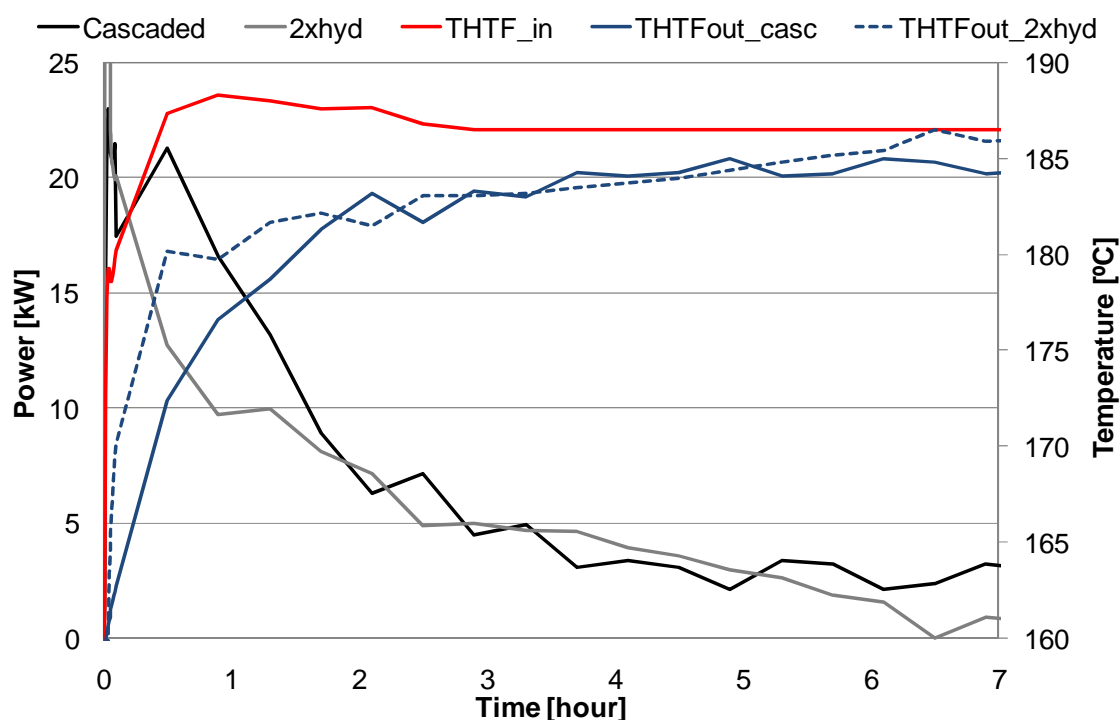


Figura 20. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.2.

A la Figura 21 es mostra el perfil de temperatures del HTF i la potència tèrmica absorbida per l'HTF pel sistema connectat en cascada i pels dos tancs d' hidroquinona connectats en paral·lel, durant la descàrrega.

S'observa que els perfils de potència absorbida per l'HTF en el sistemes estudiats en aquest cas, presenten un comportament semblant durant tota la descàrrega excepte entre els primers 30 min i 2 h de descàrrega en que l'HTF dels sistema format per dos tancs de d'hidroquinona presenta majors valors de potència absorbida. En canvi a partir de les 2 h de càrrega i fins aproximadament fins ales 3h i 30 min el comportament es el contrari, l'HTF del sistema en cascda presenta majors valors de potència absorbida. A partir de les 3h i 30 min de descàrrega ambdòs perfils de potència presenten aproximadament el mateix comportament.

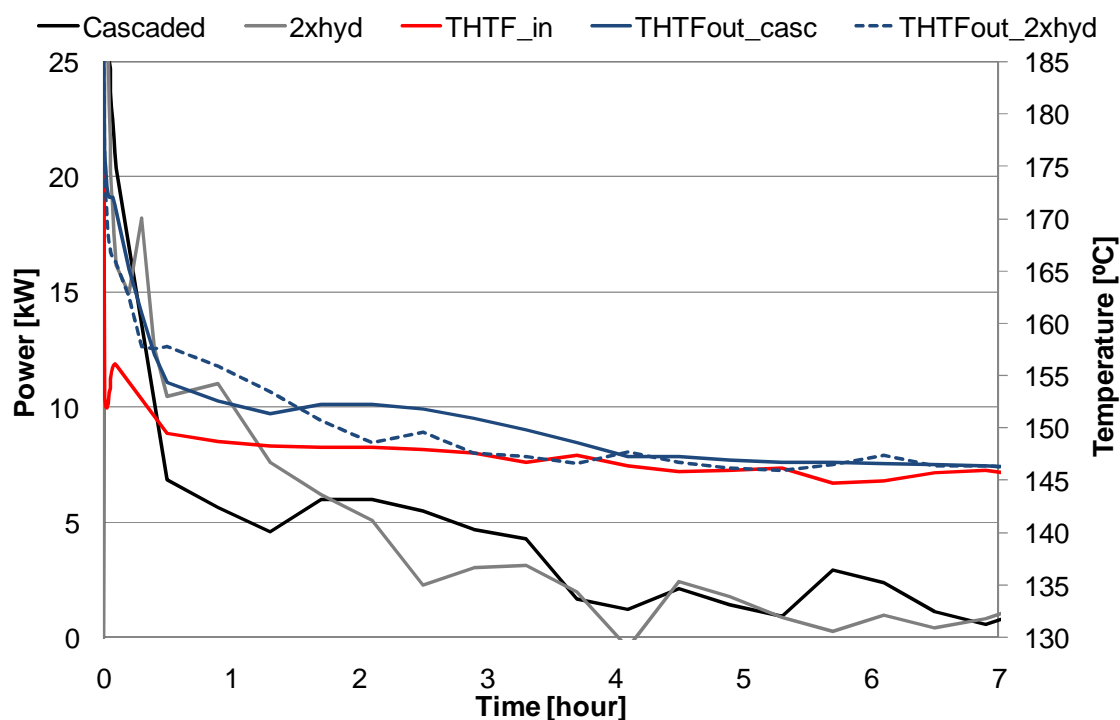


Figura 21. Perfils de temperatura del HTF i potència absorbida durant la descàrrega del escenari 1.2.

A la Figura 22 es pot veure l'evolució en el temps de l'energia acumulada pel PCM durant la càrrega per l'escenari 1.2. S'observa que el sistema format pels dos tancs

connectats en cascada acumula un 15 % més d'energia que el sistema format pels dos tancs d'hidroquinona en paral·lel, 33,9 i 29,51 kWh, respectivament.

També s'observa que durant tota la càrrega, el sistema connectat en cascada presenta majors valors d'energia acumulada. També es pot afirmar que aproximadament a les dues hores de càrrega el sistema en cascada es troba en un percentatge de càrrega d'un 93 % i en canvi el sistema en paral·lel d'aquest cas presenta un 59 %. Aquest fet evidencia una resposta més lenta per part del sistema format pels dos tancs d'hidroquinona en paral·lel. Per tant, el sistema connectat en cascada presenta una millor combinació que el sistema format per dos tancs d'hidroquinona en paral·lel.

Com era d'esperar la corba d'energia acumulada del tanc de d-mannitol del sistema en cascada presenta majors valors d'energia acumulada respecte el tancs d'hidroquinona.

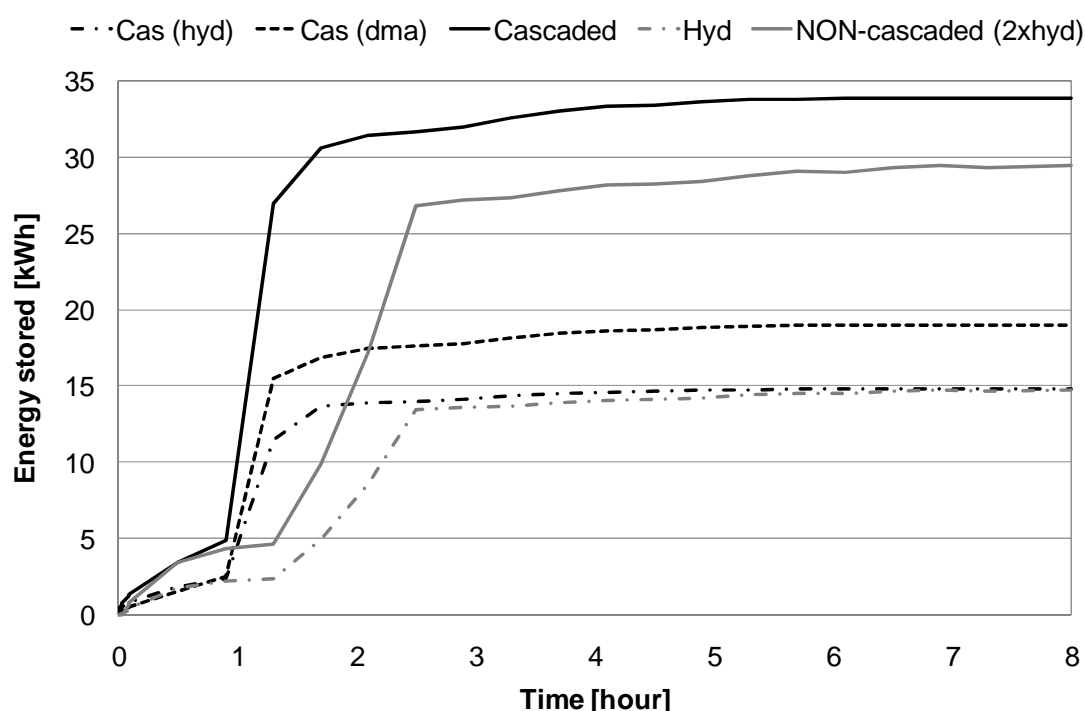


Figura 22. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.2.

De la mateixa forma que en el cas anterior, no s'ha pogut realitzar la comparativa de l'energia cedida pel PCM en la descàrrega.

A la Taula 4 es mostren els valors d'energia acumulada i/o cedida pel PCM i HTF durant la càrrega i descàrrega així com els respectius rendiments dels dos sistemes estudiats en

l'escenari 1.2. Com es pot comprovar en la càrrega l'HTF cedeix de l'ordre d'11 kWh més en el sistema en cascada que en el sistema en paral·lel. En canvi en la descàrrega pràcticament l'HTF recupera la mateixa energia en ambdós sistemes estudiats. Aquest fet evidencia que el sistema en cascada presenta més pèrdues tèrmiques que el sistema en paral·lel. Pel que fa als rendiments de càrrega i descàrrega es conclou que el sistema en paral·lel presenta millors valors de rendiment en aquest cas.

Taula 4. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.2.

	Cascaded	NON-Cascaded (2xhyd)
Energia acumulada pel PCM durant la càrrega [kWh]	33,9	29,51
Energia cedida pel PCM durant la càrrega [kWh]	32,9	28,59
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	48,2	36,4
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	27,3	27
η_{ch} [-]	0,7	0,81
η_{disch} [-]	0,8	0,9

6.1.3 Escenari 1.3

A la Figura 23 es mostra el perfil de temperatures del HTF i la potència tèrmica cedida pel mateix en el sistema connectat en cascada i en el sistema format per un tanc d'hidroquinona i un de d-mannitol en paral·lel. En aquest cas es segueix la mateixa nomenclatura que en els escenaris anteriors, amb la diferència que les variables del sistema en paral·lel van seguides del subíndex "dma+hyd". En general s'observa una tendència similar als altres escenaris pel que fa la potència cedida per l'HTF de cada sistema. També es pot observar que en aquest cas les corbes de potència del HTF del sistema en cascada i el sistema en paral·lel presenten un comportament pràcticament

idèntic, excepte a l'inici de la càrrega en que la potència cedida per l'HTF del sistema en cascada es major, ja que la diferència de temperatures del HTF entre la entrada i la sortida del sistema també és major.

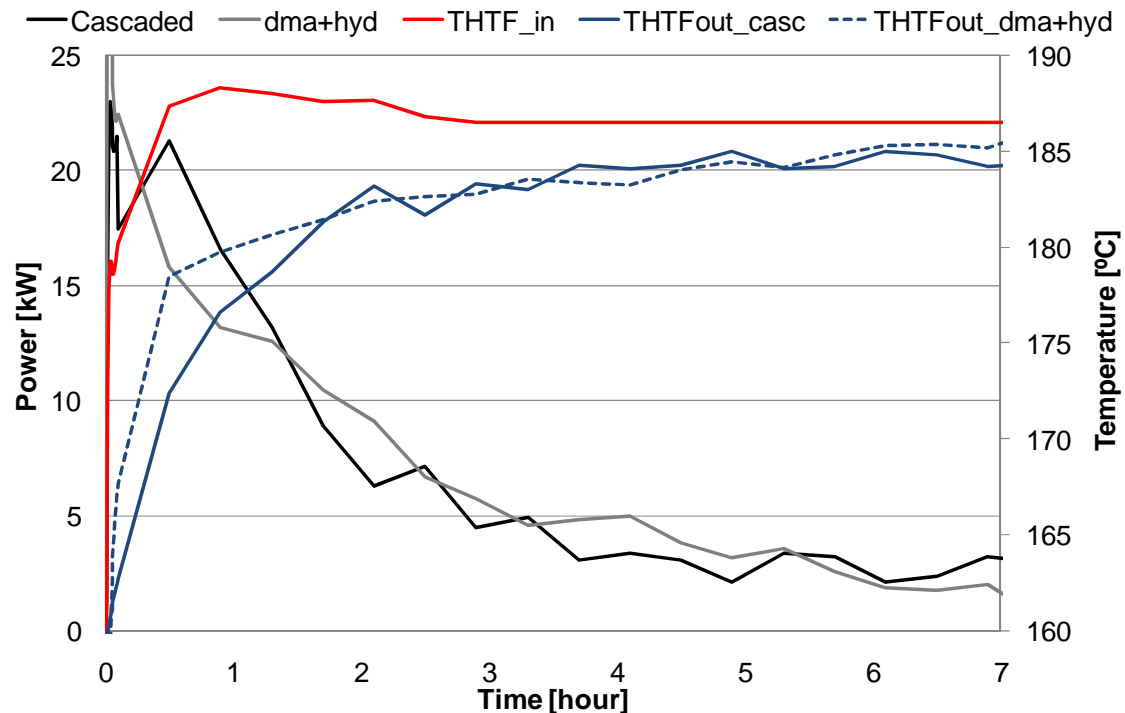


Figura 23. Perfils de temperatura del HTF i potència cedida durant la càrrega del escenari 1.3.

A la Figura 24 es mostra el perfil de temperatures del HTF i la potència tèrmica absorbida per l'HTF pel sistema connectat en cascada i per un tanc d'hydroquinona i un de d-mannitol connectats en paral·lel, durant la descàrrega.

S'observa que els perfils de potència absorbida per l'HTF en els sistemes estudiats en aquest cas, presenten un comportament semblant durant tota la descàrrega excepte entre els primers 30 min i 2 h i 30 min de descàrrega en que l'HTF dels sistema connectat en paral·lel presenta majors valors de potència absorbida.

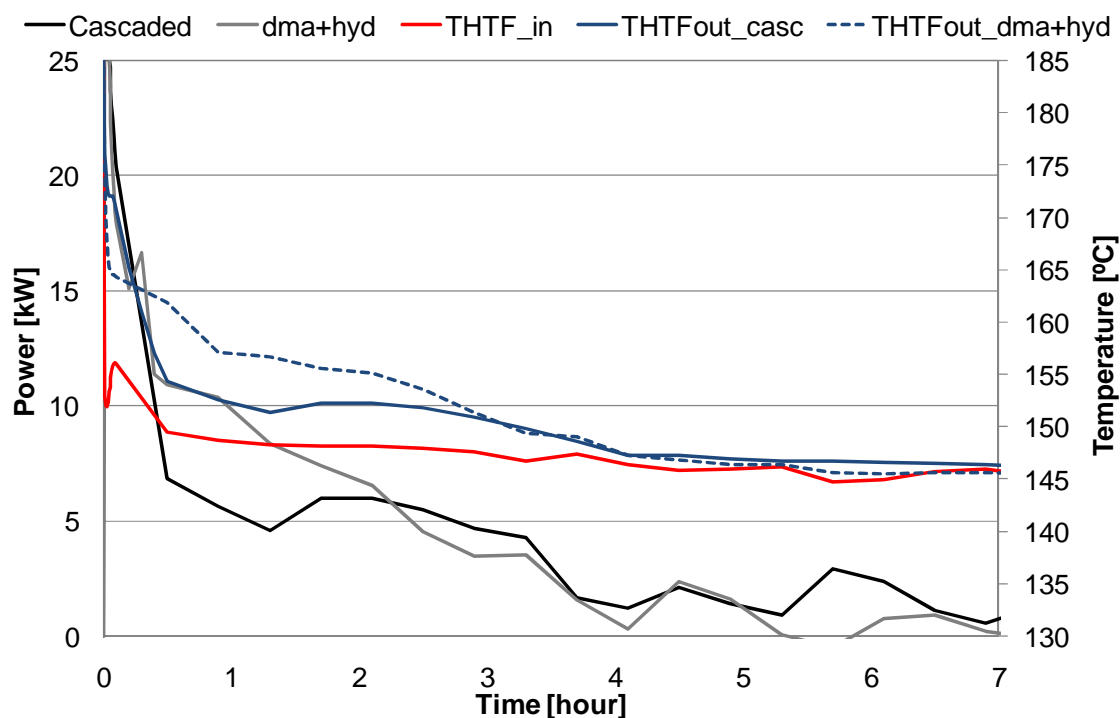


Figura 24. Perfils de temperatura del HTF i potència absorbida durant la descàrrega del escenari 1.3.

A la Figura 25 es pot veure l'evolució en el temps de l'energia acumulada pel PCM durant la càrrega per l'escenari 1.3. Com era d'esperar l'energia acumulada total durant la càrrega es pràcticament la mateixa en el sistema connectat en cascada i en els tancs de d-mannitol i hidroquinona connectats en paral·lel, ja que es disposa exactament de la mateixa massa de PCM en cada sistema. També s'observa que durant tota la càrrega, el sistema connectat en cascada presenta una evolució més ràpida en el temps, ja que a les 2h de càrrega el sistema en cascada ha completat el 93% de la càrrega mentre que el sistema en paral·lel presenta un 71,4%.

Per tant, el sistema connectat en cascada presenta una millor combinació que el sistema format per un tanc d'hidroquinona i un de d-mannitol en paral·lel.

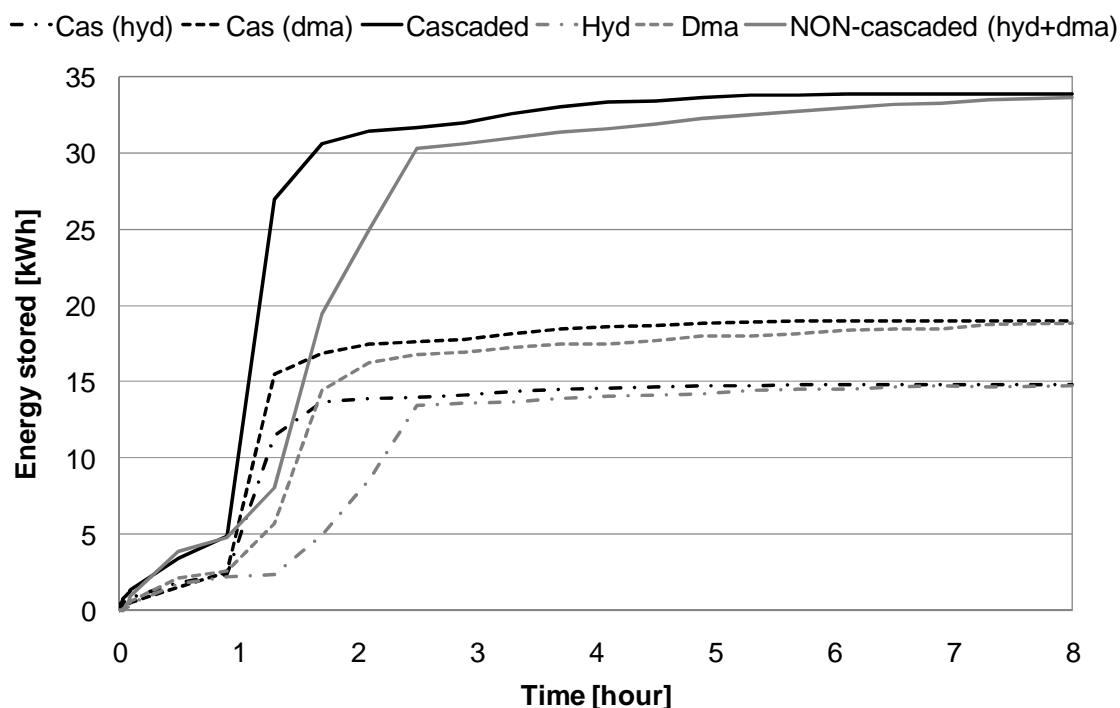


Figura 25. Energia acumulada pel PCM durant la càrrega del escenari 1.3.

A la Taula 5 es mostren els valors d'energia acumulada i/o cedida pel PCM i HTF durant la càrrega i descàrrega així com els respectius rendiments dels dos sistemes estudiats en l'escenari 1.3. Com es pot comprovar en la càrrega, l'HTF cedeix de l'ordre de 5,3 kWh més en el sistema en cascada que en el sistema en paral·lel. En canvi en la descàrrega l'HTF recupera 1,2 kWh més en el sistema connectat en paral·lel. Pel que fa als rendiments de càrrega i descàrrega és conclou que ambdòs sistemes estudiats presenten rendiments de càrrega i descarrega similars, entre 70 i 80 %.



Taula 5. Taula comparativa d'energia acumulada i rendiments per l'escenari 1.3

	Cascaded	NON-Cascaded (2xhyd)
Energia acumulada pel PCM durant la càrrega [kWh]	33,9	33,6
Energia cedida pel PCM durant la càrrega [kWh]	32,9	32,7
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	48,2	42,9
Energia HTF durant la càrrega [kWh]	27,3	28,5
η_{ch} [-]	0,7	0,78
η_{disch} [-]	0,8	0,8

6.2. Escenari 2

En aquest escenari d'estudi, bàsicament es compara el sistema connectat en cascada amb cada tanc operant per separat, segons si es tracta de cabal baix (LFR-1,4 m³/h) o cabal alt (HFR-2,8 m³/h).

Bàsicament s'han realitzat els estudis d'energia emmagatzemada, energia emmagatzemada per quilogram de PCM i el paràmetre effectiveness esmentat en l'apartat 5.6.

A la Figura 26, a mode de comprovació, es pot veure l'evolució de l'energia acumulada del sistema en cascada i dels tancs operant individualment, als diferents cabals esmentats. Tal i com s'esperava l'efecte del cabal d'HTF incideix directament en l'evolució de l'energia acumulada. En tots els casos un cabal més alt significa un augment dels percentatges de càrrega en un temps donat.

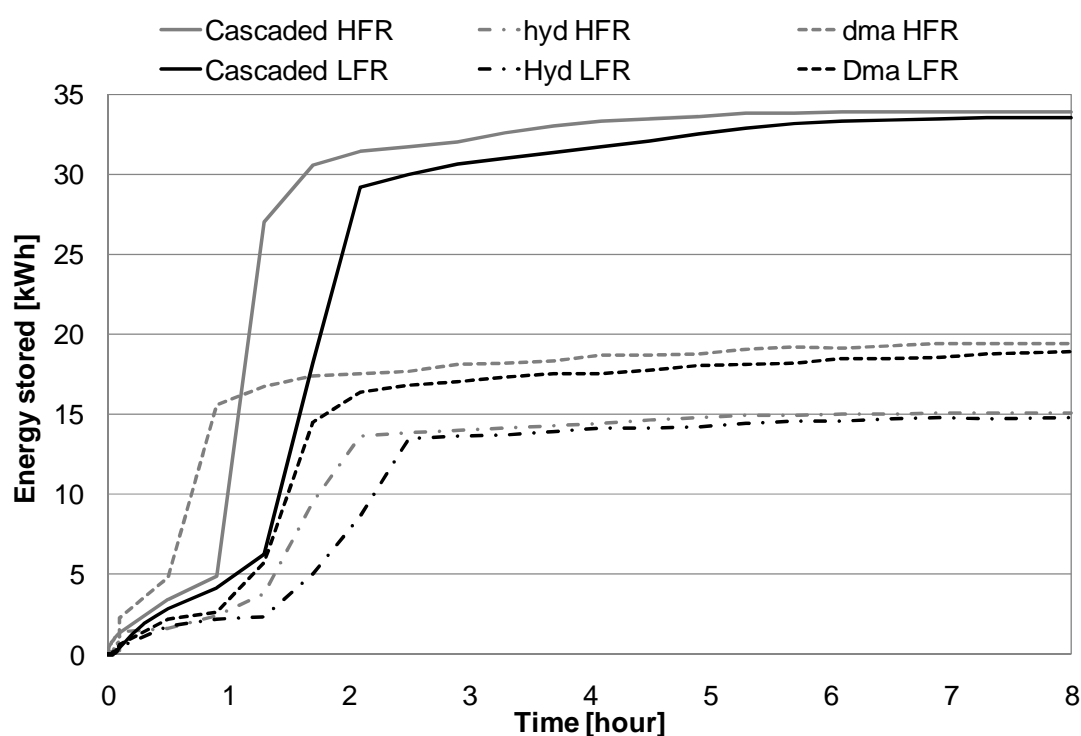


Figura 26. Evolució de l'energia acumulada pel PCM durant una càrrega del sistema cascada i dels tancs operant individualment.



Un altre paràmetre més interessant és l'energia acumulada per kilogram de PCM. A la Figura 27 es pot veure l'evolució en el temps d'aquest paràmetre per un procés de càrrega en funció del sistema i del tipus de règim de cabal. Tal i com es pot observar el sistema que emmagatzema més energia per cada quilogram de PCM al final del procés de càrrega és el format per un tanc de d-mannitol amb 0,12 kWh/kg, seguit del sistema cascada amb 0,10 kWh/kg i finalment amb 0,09 kWh/kg es troba el sistema format per un tanc d'hidroquinona.

Si es té en compte l'evolució en el temps, es pot determinar que el sistema format per un tanc de d-mannitol operant amb cabal alt, presenta durant tota la càrrega valors superiors d'energia emmagatzemada per quilogram respecte a la resta de sistemes estudiats. Exceptuant el d-mannitol a cabal alt anteriorment esmentat, també es pot destacar que el sistema en cascada operant amb cabal alt presenta majors valors d'energia acumulada per kilogram durant les primeres 2h de càrrega respecte els altres sistemes. A partir de les 2h de càrrega es destaca el sistema de d-mannitol a cabal baix. Seguidament es pot destacar el sistema en cascada a cabal baix que durant les primeres 2h de càrrega presenta una evolució similar a la hidroquinona a cabal alt, a partir d'aquest temps presenta valors superiors a aquesta. Finalment es destaca el tanc d'hidroquinona a cabal baix com el sistema que presenta els menors valors d'energia acumulada per quilogram de PCM.

A l'igual que en l'escenari 1 no s'ha pogut realitzar els estudis anteriors pel que fa a la descàrrega, donat que el subcooling que preseneta el d-mannitol dificulta la caracterització de l'energia acumulada per aquest, en el temps de descàrrega

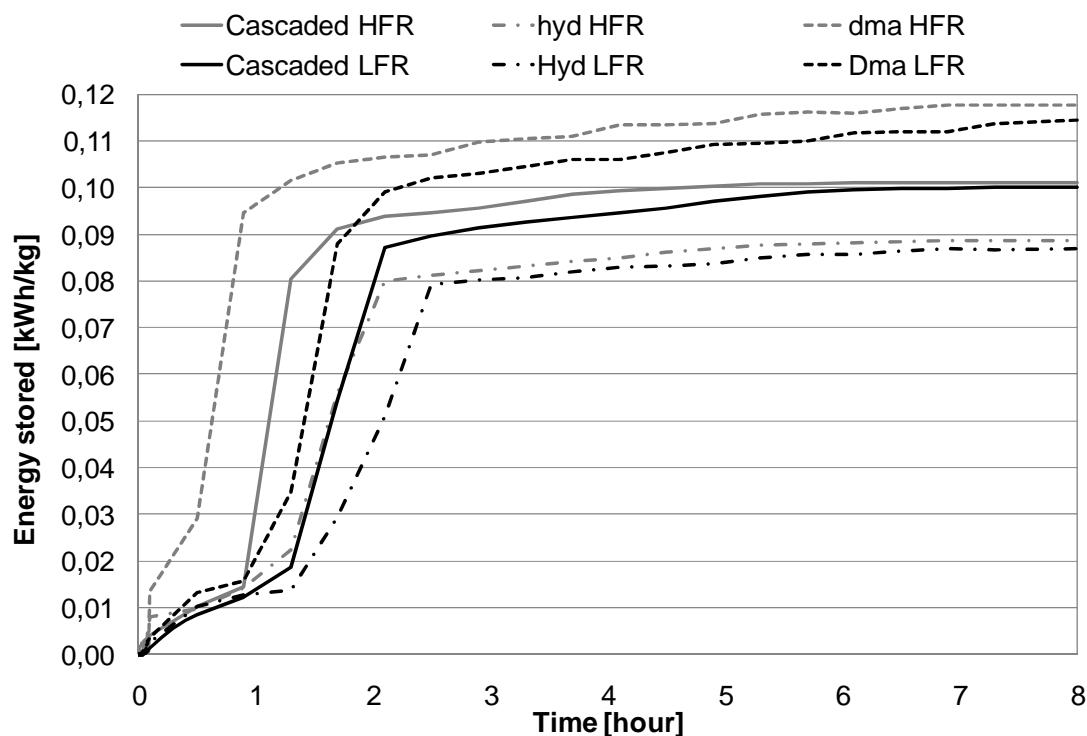


Figura 27. Evolució de l'energia acumulada per kg de PCM durant una càrrega del sistema en cascada i dels tancs operant individualment.

Tal i com s'ha comentat en anterioritat, un paràmetre important per tal de poder caracteritzar el comportament tèrmic dels diferents sistemes estudiats és l'*effectiveness*.

A la Figura 28 es mostra el paràmetre *effectiveness* d'una càrrega amb un règim de cabal baix per cada tanc del sistema en cascada i per cada tanc operant per separat. Tal i com s'esperava el paràmetre *effectiveness* presenta una tendència decreixent al llarg de la fusió degut a que cada cop la diferència de temperatures entre l'entrada i sortida del HTF es menor.

En general, es pot observar que el tanc de d-mannitol del sistema en cascada (dma-cas LFR) presenta valors més elevats per aquest rati durant la primera hora de fusió, respecte als altres tancs. Aquest valor oscil·la entre un 65 % i 40 % i indica que el sistema en cascada millora notablement l'eficàcia de bescanvi en el tanc de d-mannitol respecte al mateix operant individualment que presenta uns valors que oscil·len entre un 50 % i 40 % durant la primera hora de fusió. A partir d'aquest temps tant el d-mannitol

del sistema en cascada com el mateix operant individualment presenten un comportament quasi idèntic en relació a l'effectiveness.

Pel que fa al tanc d'hidroquinona del sistema en cascada, s'observa que durant la fusió presenta valors inferiors al mateix tanc operant individualment.

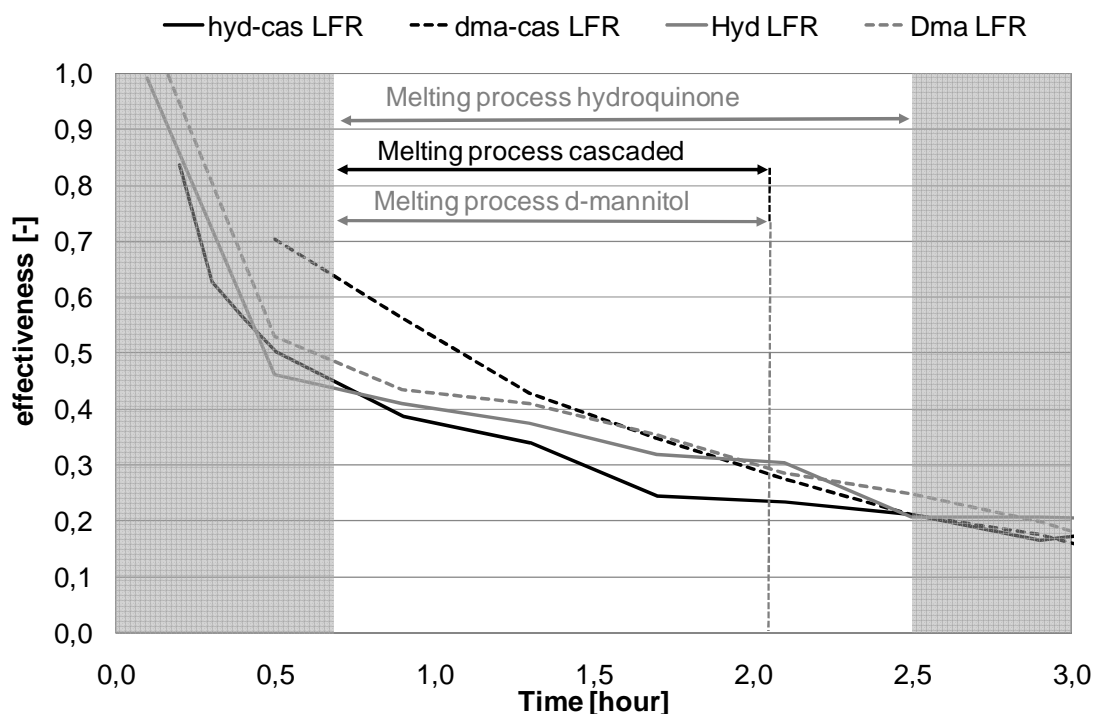


Figura 28. Effectiveness durant el procés de fusió del PCM a cabal baix per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.

A la Figura 29 es mostra el paràmetre *effectiveness* d'una descàrrega amb un règim de cabal baix per cada tanc del sistema en cascada i per cada tanc operant per separat. Com es pot observar el tanc d'hidroquinona del sistema en cascada (hyd-cas LFR) presenta valors més elevats (55%-33%) durant la primera hora de la solidificació respecte al tanc d'hidroquinona operant individualment (Hyd-LFR) (40%-33%). En aquest cas es pot concloure que el sistema en cascada millora l'eficàcia de bescanvi del tanc d'hidroquinona connectat en cascada respecte al mateix operant individualment. A partir de d'aquest temps tant el tanc d'hidroquinona del sistema en cascada com el mateix operant individualment presenten un comportament quasi idèntic en relació a l'effectiveness, encara que el segon presenta valors lleugerament inferiors al primer. Pel

que fa al d-mannitol, s'observa com el fenomen del *subcooling* influeix en la tendència del paràmetre *effectiveness* ja que es pot veure en la Figura 29 com el tanc de d-mannitol connectat en cascada presenta a l'inici de la solidificació un valor de l'*effectiveness* corresponent al 50 %, passada una hora de la solidificació presenta valors del 15 % i posteriorment torna a augmentar fins a valors del 23 % aproximadament. Tal i com es pot comprovar la devallada de l'*effectiveness* fins al 15 % coincideix amb el pic inferior de temperatura que presenta el d-mannitol en el sistema en cascada quan apareix el fenomen del *subcooling*. Aquest fet implica que no es pugui obtenir una conclusió fiable sobre el comportament del d-mannitol en relació al paràmetre *effectiveness* durant la descàrrega a cabal baix.

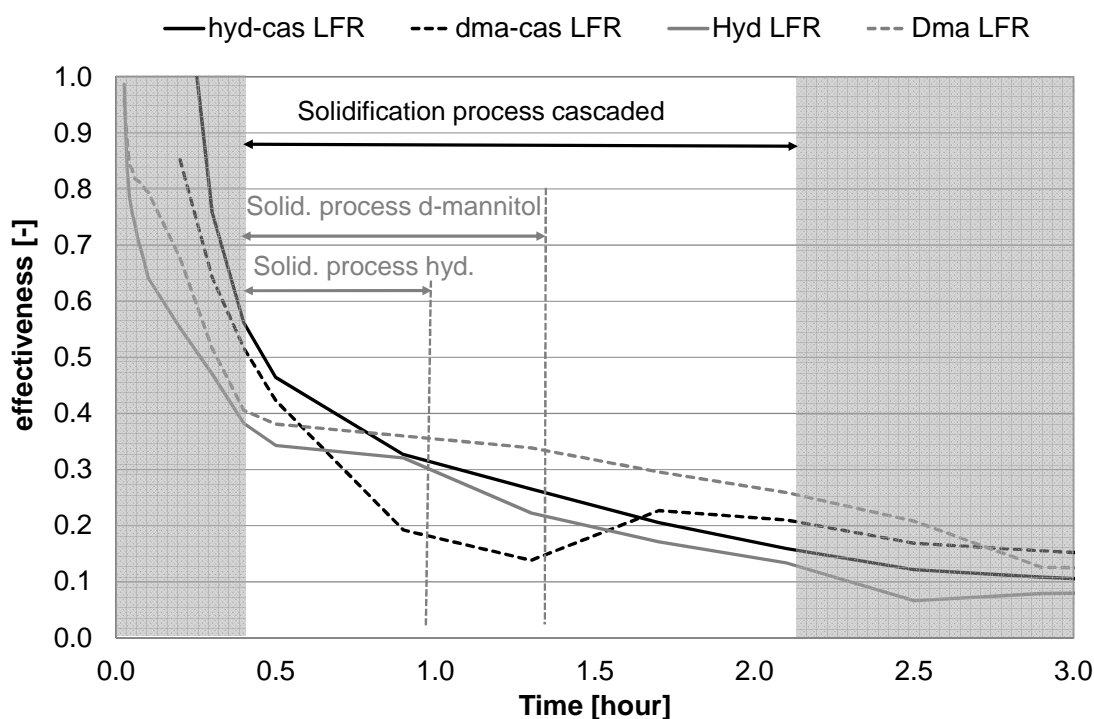


Figura 29. Effectiveness durant el procés de solidificació del PCM a cabal baix per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.

A la Figura 30 es mostra el paràmetre *effectiveness* d'una càrrega amb un règim de cabal alt per cada tanc del sistema en cascada i per cada tanc operant per separat. En aquest cas s'observa una tendència similar al que s'ha pogut observar en el cas de cabal baix. El tanc de d-mannitol del sistema en cascada presenta majors valors d'eficàcia a

l'inici de la solidificació. En canvi, s'observa que el tanc d'hidroquinona del sistema en cascada també presenta majors valors que el mateix tanc operant individualment. També s'observa que aproximadament quan ha passat una 1h i 20 min de descàrrega, el tanc d'hidroquinona del sistema en cascada presenta majors valors que el tanc de d-mannitol del mateix sistema. Per tant, en aquest cas, es pot afirmar que amb aquest règim el sistema en cascada millora l'eficàcia del bescanvi del tanc de d-mannitol i el d'hidroquinona respecte als mateixos tancs operant individualment.

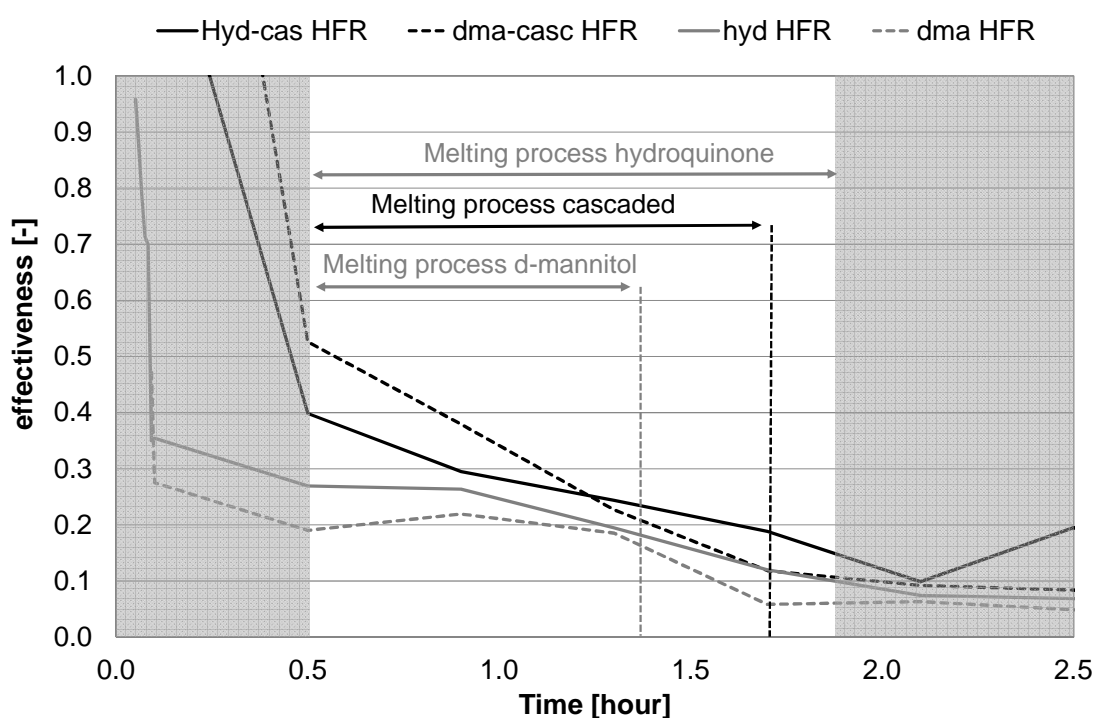


Figura 30. Effectiveness durant el procés de fusió del PCM a cabal alt per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.

A la Figura 31 es mostra el paràmetre *effectiveness* d'una descàrrega amb un règim de cabal alt per cada tanc del sistema en cascada i per cada tanc operant per separat. En aquest cas s'observa una tendència molt similar en els tancs d'hidroquinona en cascada i el tanc d'hidroquinona operant individualment, encara que aquest últim presenta valors lleugerament inferiors d'eficàcia al llarg de la solidificació. A l'igual que passava a cabal baix, en la corba d'eficàcia dels tancs de d-mannitol s'observa com aquest paràmetre es veu afectat pel subcooling. També es pot observar, com a partir d'1h aproximadament

de descàrrega el tanc de d-mannitol operant individualment presenta valors més elevats d'eficàcia respecte els altres tancs. Pel que fa al tanc de d-mannitol del sistema en cascada, aquest presenta els pitjors valors d'eficàcia durant bona part de la solidificació (menys de 10%). A l'igual que en el cas anterior (LFR), el fenomen de *subcooling* en el d-mannitol, implica que no es pugui obtenir una conclusió fiable sobre el comportament d'aquest, en relació al paràmetre effectiveness durant la descàrrega a cabal alt.

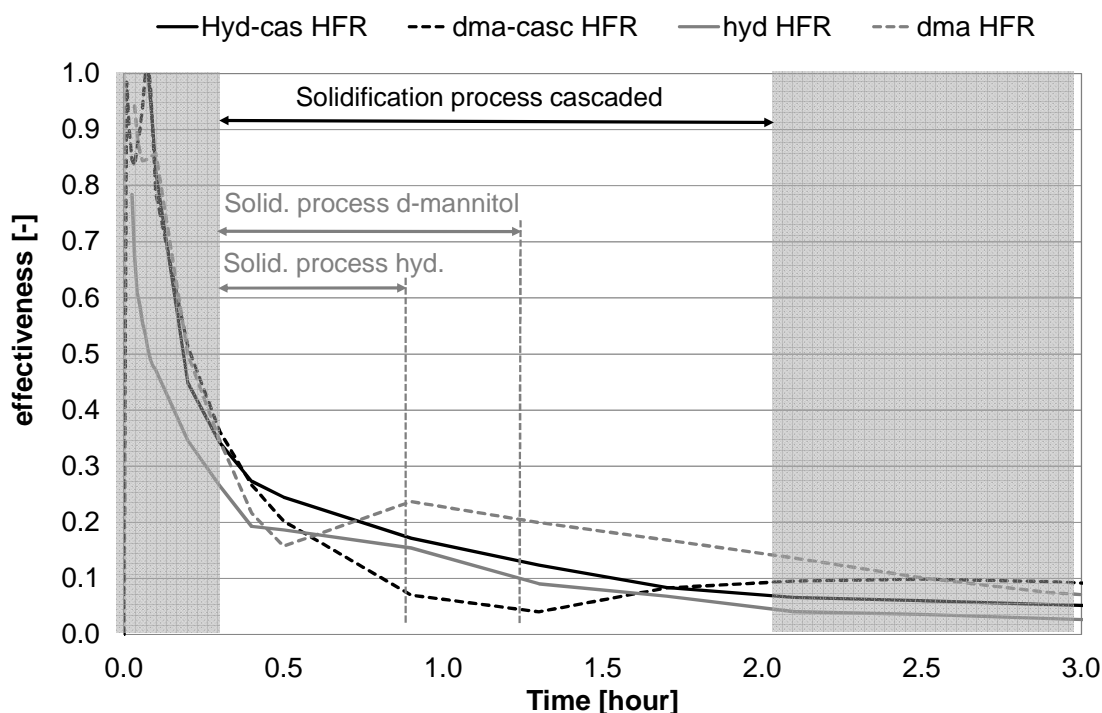


Figura 31. Effectiveness durant el procés de solidificació del PCM a cabal alt per als diferents sistemes estudiats en l'escenari 2.



6.3. Comparativa sobre el preu del PCM

En aquest apartat s'ha realitzat una comparativa en relació al preu dels diferents sistemes estudiats. Com en aquest cas els tancs de cada sistema són idèntics, no s'ha considerat el preu de l'acer i el mecanitzat del tanc i per tant només es fa referència al preu del PCM.

A la Taula 6 es mostra la comparativa esmentada en anterioritat. Tal i com es pot observar el sistema que resulten més econòmics, des del punt de vista del preu del PCM, són els que utilitzen d-mannitol ja que el preu unitari del mateix és 41% més barat respecte la hidroquinona.

Per exemple, un sistema format per dos tancs de d-mannitol des del punt de vista del preu del PCM que conetnen assoleix un valor de 1947 € i en canvi el sistema en cascada de 2741,5 €.

Taula 6. Comparativa en relació al preu del PCM que contenen els diferents sistemes estudiats en l'escenari 1 i 2.

Concepte	Preu unit. [€/kg]	Massa total [kg]	Preu total [€]
Hidroquinona	10,4	170	1768
d-mannitol	5,9	165	973,5
2 Tancs amb hidroquinona	10,4	340	3536
2 Tancs amb d-mannitol	5,9	330	1947
Hidroquinona + d-mannitol	-	335	2741,5

7. Conclusions

El present treball s'ha dut a terme a fi de poder proporcionar solucions al model energètic actual i més concretament en el camp de la generació de fred, ja sigui pel confort humà o per la conservació d'aliments. Una d'aquestes solucions és la generació de fred mitjançant l'energia solar a través de màquines d'absorció, però la naturalesa intermitent del sol es presenta com un dels factors limitants pel desenvolupament d'aquesta tecnologia. És per aquest motiu que l'emmagatzematge d'energia suposa un factor clau per poder-la desenvolupar correctament.

L'objectiu principal d'aquest treball és estudiar el potencial d'emmagatzematge que ofereix un sistema format per dos tancs connectats en cascada amb diferent material de canvi de fase (PCM). No s'ha pogut realitzar la comparativa d'un sistema en cascada amb un sistema no cascada, tal i com s'ha fet en estudis precedents, al no disposar de dos tancs en sèrie amb la mateixa massa de PCM que el sistema cascada però d'un únic material o al no disposar d'un tanc amb la meitat de massa de cada material. En el seu defecte, s'han comparat els resultats del sistema en cascada amb els obtinguts quan els tancs operen en paral·lel o individualment. Sistema que pot ser útil en processos industrials on es genera molt cabal d'HTF per evacuar la calor residual dels processos.

Per tal poder realitzar el present treball, s'ha utilitzat dos tancs intercanviadors de carcassa i tubs. Els materials utilitzats han estat la hidroquinona i el d-mannitol ja que posseeixen un rang de temperatures de canvi de fase entre 140 °C-200 °C, interval requerit en aplicacions de refrigeració solar i perquè presenten una entalpia de canvi de fase superior a 150 kJ/kg. En el cas de la hidroquinona, també va ser escollida perquè presentava poc *subcooling* a escala de laboratori i en el cas del d-mannitol degut a que a la seva elevada entalpia de canvi de fase. Cada material s'ha dipositat en un tanc diferent els quals s'han connectat en cascada a la planta pilot que posseeix el grup GREa de la Universitat de Lleida, la qual utilitza Therminol VP1 com a fluid caloportador (HTF).



S'han dissenyat dos tipus d'experiments (càrregues i descàrregues), segons si el cabal d'HTF és a $1,4 \text{ m}^3/\text{h}$ o a $2,8 \text{ m}^3/\text{h}$ i amb un interval de temperatures de 145°C a 187°C . Cada càrrega i descàrrega s'ha realitzat en un mínim de 8 h.

Un cop realitzats els experiments s'han generat dos escenaris d'estudi, un escenari on s'han comparat el sistema format pels dos tancs connectats en cascada amb diferents configuracions dels tancs en paral·lel i un altre escenari on s'ha comparat el comportament del sistema en cascada i dels tancs operant individualment per cada un dels cabals d'HTF esmentats en anterioritat. A més a més s'ha realitzat un comparativa sobre la incidència del preu del PCM en cada sistema estudiat.

Sobre els resultats obtinguts, es pot afirmar que el sistema connectat en cascada presenta una resposta més lenta i constant pel que fa a la temperatura de sortida de l'HTF. Aquest fet té més importància a la descàrrega, ja que si es proporciona a l'equip consumidor de un flux d'energia a una temperatura més constant, s'augmenta l'eficiència d'aquest i s'allarga la seva vida útil.

Per altra banda, s'observa que el d-mannitol del sistema en cascada presenta un gran *subcooling* en la descàrrega fet que empitjora la transferència de calor del PCM a l'HTF i augmenta el temps de descàrrega del sistema. En aquest cas només s'ha pogut realitzar l'estudi energètic en la càrrega. Aquest factor es destaca com factor exclouent dels sistemes que utilitzin d-mannitol, ja que el subcooling és un efecte no desitjat en sistemes d'emmagatzematge.

En general, tal i com s'esperava en un inici, es pot establir que el sistema amb major entalpia i major règim de cabal present majors valors en els ratis d'energia acumulada en el temps de càrrega.

Sobre la compració del sistema en cascada amb els diferents sistemes en paral·lel, es destaca que tots els sistemes presenten rendiments de càrrega i descàrrega similars, entre el 70 i 90%. Tenint en compte aquest fet l'estudi realitzat en l'escenari 1 és té el següent:

- El sistema en cascada presenta una major potència entregada a l'HTF durant l'inici de la càrrega respecte els altres sistemes estudiats. Això provoca una reducció en els temps de càrrega.



- El sistema en cascada és constitueix com una bona solució a càrregues parcials parcials ja que a les 2h de càrrega presenta un 93% de càrrega en comparació a un 86 % dels tancs de d-mannitol, 71,4 % del paral·lel d'un tanc d'hidroquinona i un de d-mannitol i un 59 % dels tancs d'hidroquinona.

També es destaca que el sistema en cascada a règim de cabal alt, millora notablement l'eficàcia en el bescanvi de calor entre l'HTF i el PCM de la càrrega tant del tanc d'hidroquinona com del tanc de d-mannitol, respecte els mateixos tancs operant per separat. Per altra banda, no s'han extret conclusions fiables en el mateix aspecte pel que fa a la descàrrega degut al *subcooling* que presenta el d-mannitol.

En conclusió de tots els sistemes estudiats, el sistema connectat en cascada presenta millor comportament a càrregues parcials i millors ratis en l'eficàcia de bescanvi de calor entre HTF i PCM dels respectius tancs. També es destaca el sistema format per dos tancs de d-mannitol connectats en paral·lel com el sistema que acumula més energia. Però ambdós sistemes presenten el fenomen de *subcooling* el qual no es desitjat.

Finalment cal destacar, en funció dels resultats obtinguts, que si es milloren les pèrdues tèrmiques de la connexió entre tancs del sistema en cascada i es millora l'efecte del subcooling del d-mannitol o es proposen altres materials de canvi de fase, es pot millorar substancialment l'efecte de la configuració en cascada estudiada en el present treball.



8. Propostes de futur

A continuació es mostren una sèrie de propostes de futur en el mateix camp de treball:

- Realitzar els mateixos experiments en dos tancs de d-mannitol en sèrie i comparar-los amb els resultats obtinguts en el present treball pel sistema en cascada.
- Realitzar els mateixos experiments en dos tancs de d'hidroquinona en sèrie i comparar-los amb els resultats obtinguts en el present treball pel sistema en cascada.
- Realitzar els mateixos experiments minimitzant l'efecte del *subcooling* del d-mannitol, mitjançant agent nucleants.
- Realitzar el mateixos tipus d'experiment canviant les temperatures de càrrega i descàrrega per tal d'avaluar l'efecte de les condicions d'experimentació en el *subcooling* del d-mannitol
- Realitzar càrregues i descàrregues amb el flux d'HTF en sentit contrari al proposat.
- Realitzar experiment amb altres PCM amb una major diferència de temperatures de canvi de fase que la hidroquinona i el d-mannitol per tal de maximitzar l'efecte del sistema en cascada.

9. Referències

- [1] <http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Esquema-desenvolupament-sostenible.png>
- [2] International Energy Agency (IEA). *Key world energy statistics. 2012. Pag. 6*
- [3] International Energy Agency (IEA). *Key world energy statistics. 2012. Pag. 44*
- [4] [.http://www.nasa.gov/images/content/57911main__Earth_Budget.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/57911main__Earth_Budget.jpg); The *Earth's energy budget*, 2012
- [5] Chidambaram LA., Ramanab AS., Kamaraja G., Velraj R. *Review of solar cooling methods and thermal storage options*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15:3220-3228.
- [6] Gong, Z.X., Mujumdar, A.S., 1996. Enhancement of energy charge–discharge rates in composite slabs of different phase change materials. *Int. J. Heat Mass Transfer* 39, 725–733.
- [7] Watanabe, T., Kanzawa, A., 1995. Second law optimization of a latent heat storage system with PCMs having different melting points. *Heat Recov. Syst. CHP* 15, 641–653.
- [8] Farid M.M, Kim, Y, Kanzawa. Thermal performance of heat storage module using PCM's with different melting temperature: Experimental. *Journal of solar Energy Engineering* 1990; vol 112/131.
- [9] Gil T., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza LF. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:31-55.
- [10] Medrano M., Gil A., Martorell I., Potau X., Cabeza LF. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:56-72.
- [11] Shabgard H., Robak CW., Bergman TL., Faghri A. Heat transfer and exergy analysis of cascaded latent heat storage with gravity-assisted heat pipes for concentrating solar power applications. *Solar Energy* 2012;86:816–830



-
- [12] Michels H., Pitz-Paal R. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. *Solar Energy* 2007;81:829–837
 - [13] Gil A., Oró E., Peiró G., Álvarez S., Cabeza LF. Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling, *Renewable Energy* 2013;57:366-371.
 - [14] Antoni Gil, Eduard Oró, Albert Castell, Luisa F. Cabeza. Experimental analysis of the effectiveness of a high temperature thermal storage tank for solar cooling Applications. *Applied Thermal Engineering* 54 (2013) 521-527
 - [15] Oró E., Gil A, Miró L., Peiró G., Álvarez S., Cabeza LF. Thermal energy storage implementation using phase change materials for solar cooling and refrigeration applications. *Energy Procedia* 2012; 30:947-956.